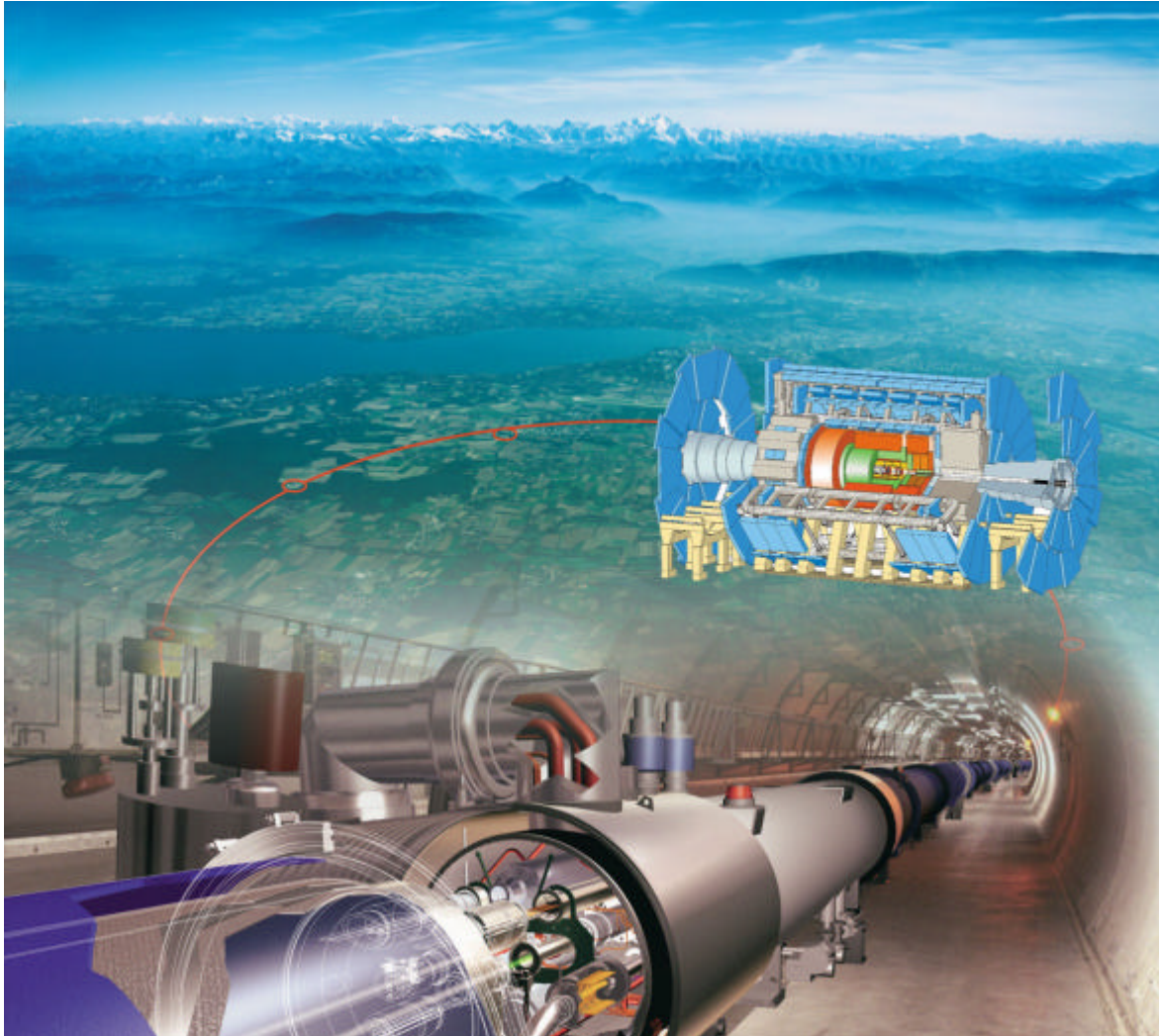


Quo Vadis Standard-Modell? Teilchenphysik mit ATLAS bei LHC



Stefan Tapprogge

JOHANNES
GUTENBERG
UNIVERSITÄT
MAINZ

Institut für Physik,
ETAP Gruppe

Physikalisches Kolloquium
Mainz, 26. Oktober 2004





- Standard-Modell der Teilchenphysik
 - Bausteine der Materie und Wechselwirkungen
 - Präzisionsmessungen
 - Offene Fragen im Standard-Modell
 - Physik bei LHC
- Der LHC Beschleuniger
- Der ATLAS Detektor
- Physik-Potential bei ATLAS
 - Beispiele für erwartete Messungen
- Das Trigger- und Datenerfassungssystem
- Zusammenfassung und Ausblick









Standard - Modell

Bausteine und Wechselwirkungen




Leptons

Tau		-1	0		Tau Neutrino
Muon		-1	0		Muon Neutrino
Electron		-1	0		Electron Neutrino


Electric Charge

Strong


Gluons (8)



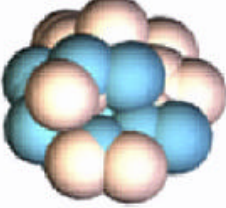
Quarks



Mesons Baryons




Nuclei

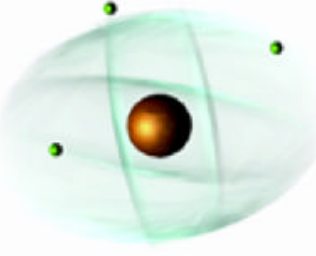


Electromagnetic

Photon








Atoms
Light
Chemistry
Electronics



Quarks


Electric Charge

Bottom		-1/3	2/3		Top
Strange		-1/3	2/3		Charm
Down		-1/3	2/3		Up


each quark: R, B, G 3 colors

Gravitational

Graviton ?

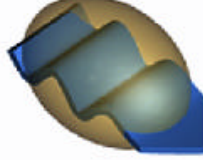


Solar system
Galaxies
Black holes

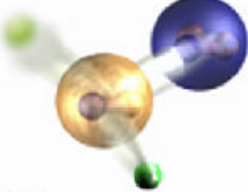


Weak

Bosons (W,Z)



Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun





- Lagrange-Dichte

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + i\bar{\psi}D\psi$$

$$+ \psi_i \lambda_{ij} \psi_j h + h.c.$$

$$+ |D_\mu h|^2 - V(h)$$

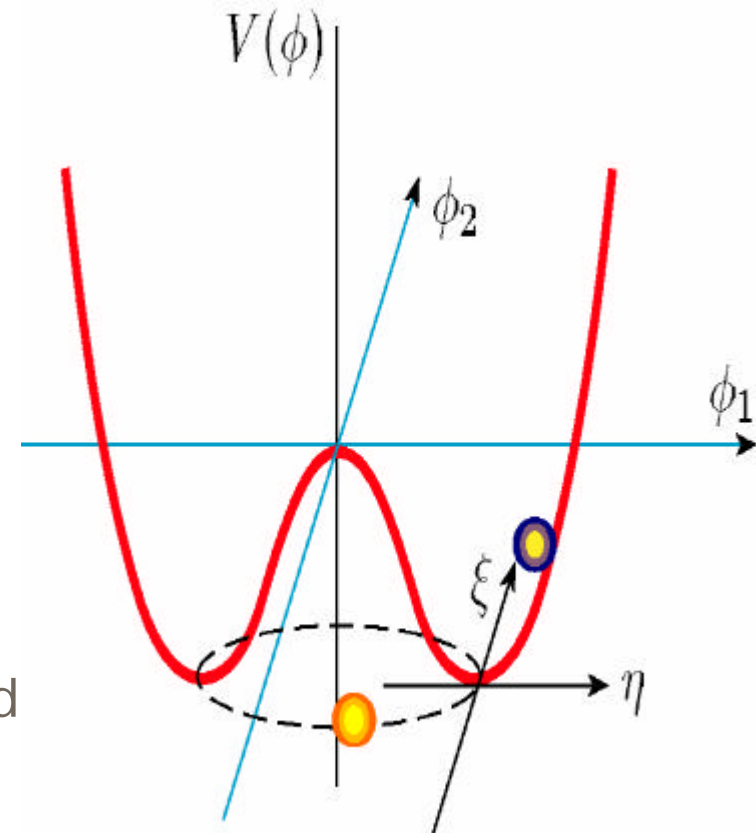
$$+ \frac{1}{M} L_i \lambda_{ij}^\nu L_j h^2 \text{ or } L_i \lambda_{ij}^\nu N_j$$

- Eichsektor
- Flavour-Sektor
- Elektroschwache Symmetriebrechung
- Neutrino-Massen

$$D_\mu = \partial_\mu - i g_{EM} Y A_\mu - i g_{weak} \frac{\tau^a}{2} W_\mu^a - i g_{strong} \frac{\lambda^b}{2} G_\mu^b$$



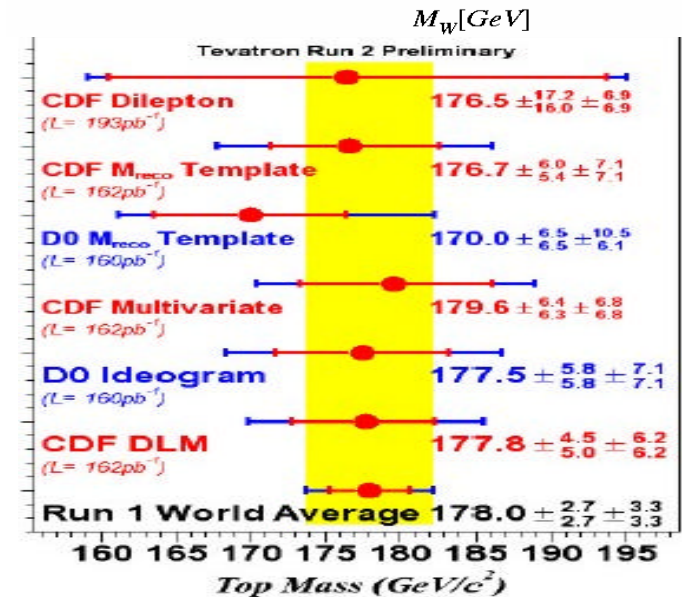
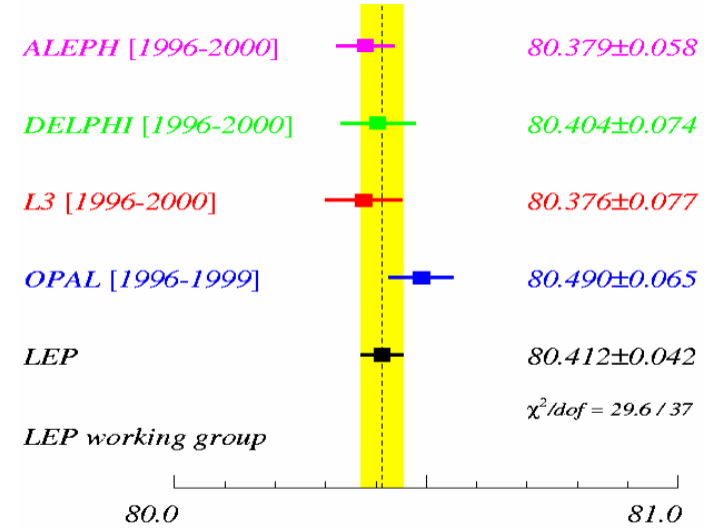
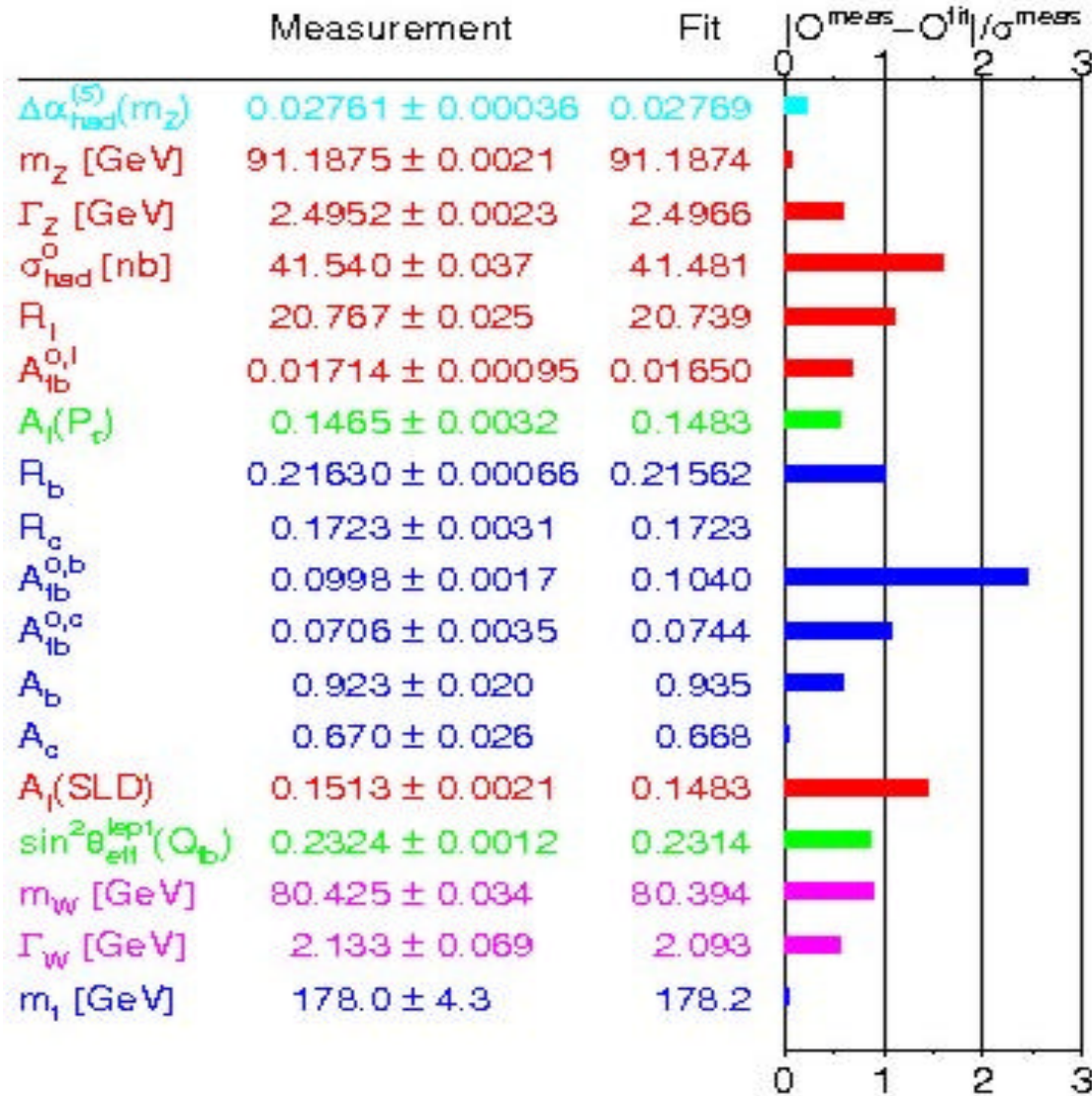
- Einführung eines skalaren Feldes
 - Feld ist symmetrisch
 - Grundzustand bricht Symmetrie
 - Spontane Symmetriebrechung
- Zwei unabhängige Felder
 - massives Teilchen (Higgs)
 - Masseloser Freiheitsgrad
 - zusätzlicher Polarisationszustand
 - Masse für Vektorbosonen
- Masse der Fermionen durch Yukawa-artige Kopplung
 - Kopplung an Fermionen $\sim m_f^2$





Summer 2004

Winter 2003 - LEP Preliminary



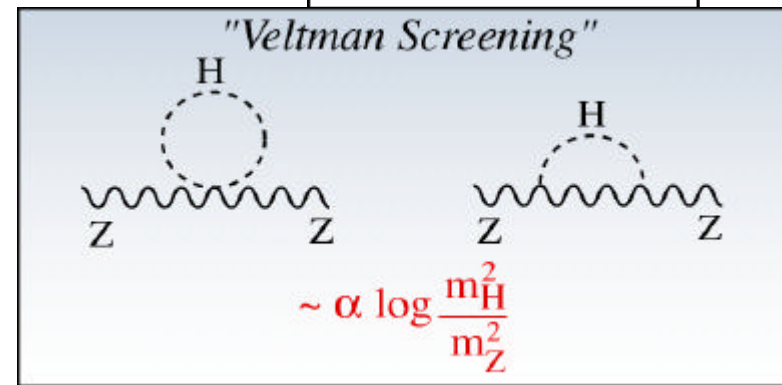
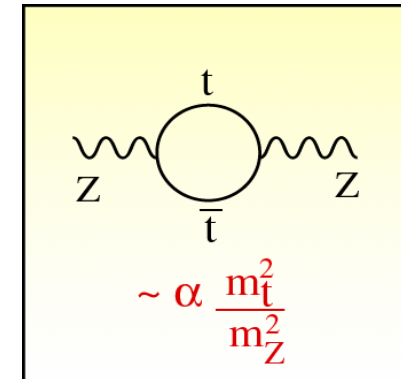
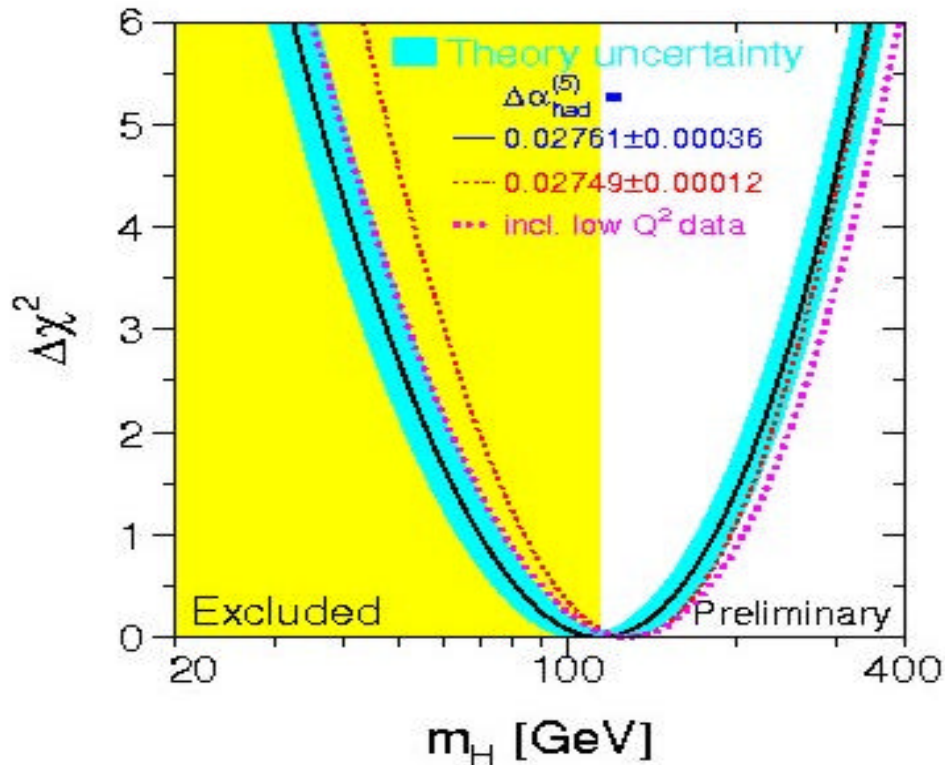


- Standard-Modell Anpassung

→ $\log(M_{\text{Higgs}}/\text{GeV}) = 2.06 \pm 0.21$

→ $M_{\text{Higgs}} = 114^{+69}_{-45} \text{ GeV}$

→ $M_{\text{Higgs}} < 260 \text{ GeV (95\% C.L.)}$

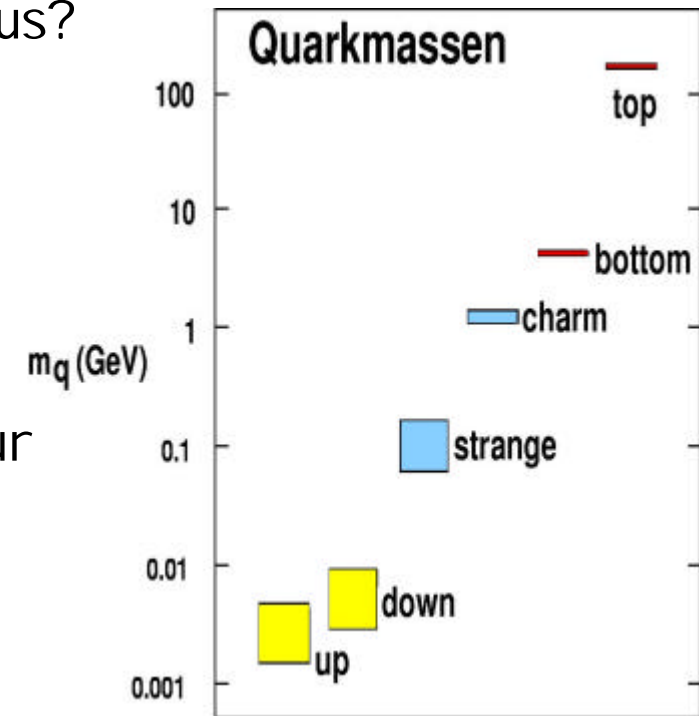


Direkte Suche
(LEP)

$M_{\text{Higgs}} > 114.4 \text{ GeV}$
(95% C.L.)



- Brechung der elektroschwachen Symmetrie
 - Beschreibung durch Higgs-Mechanismus?
- Massen der Leptonen und Quarks
 - Hierarchie der Quarkmassen
 - (kleine) Masse der Neutrinos
- Warum 3 Fermion-Familien?
 - Symmetrie der Lepton/Quark Struktur
- Quantisierung der Ladung
- Universum
 - Warum durch Materie dominiert ?
 - Was ist 'dunkle Materie' ?
 - Rolle der 'dunklen Energie'
- Vereinheitlichungen aller Kräfte
 - Rolle der Gravitation, zusätzliche Raum-Zeit Dimensionen?



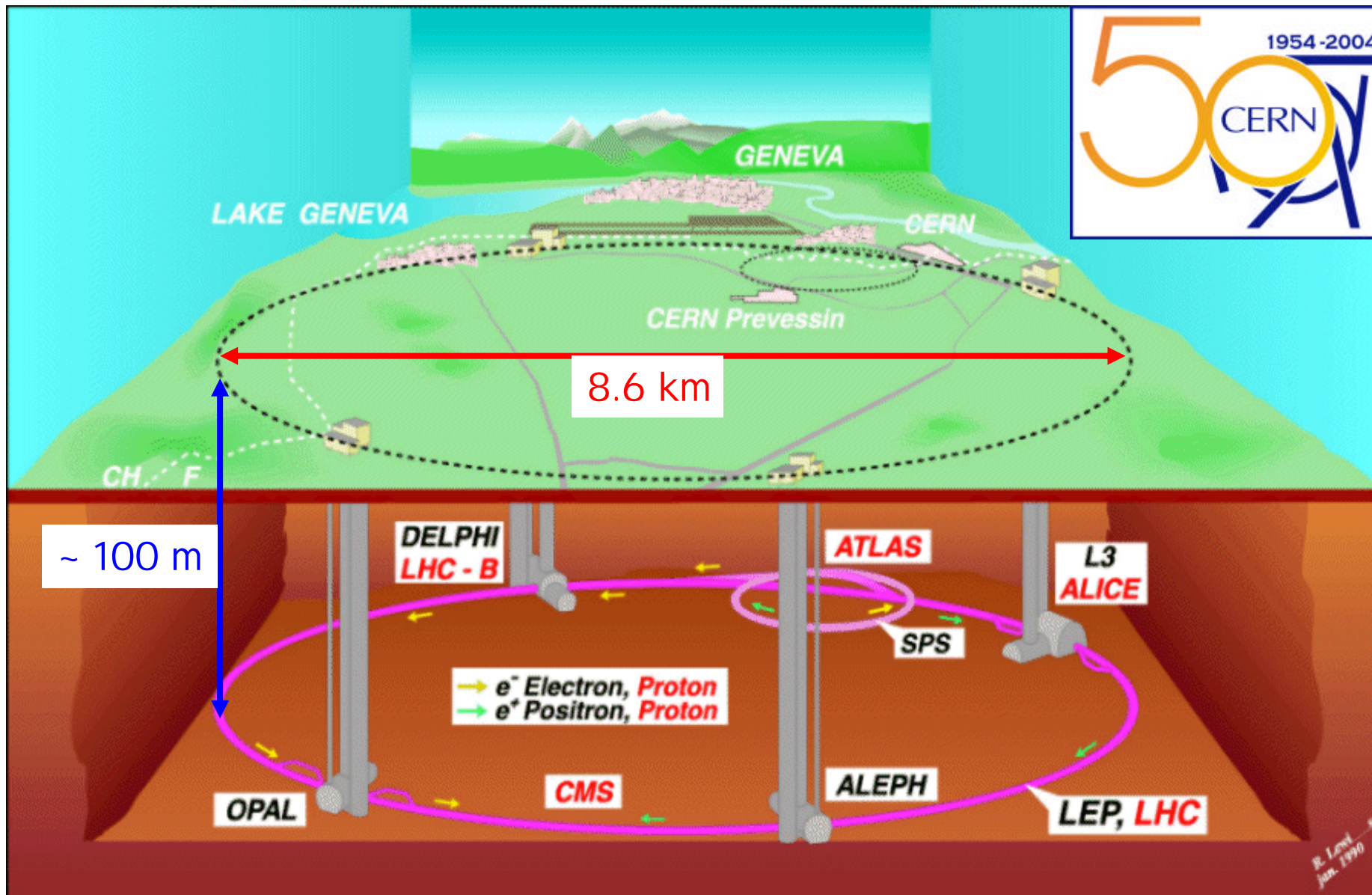


- Higgs-Beobachtung und Vermessung
- Präzisionsmessungen
 - top-Quarkmasse und Eigenschaften
 - W-Bosonmasse
 - Vektorboson-Selbstkopplungen
- Neue Physik jenseits des Standard-Modells
 - Supersymmetrie
 - Zusätzliche (versteckte) Raum-Zeit Dimensionen
 - Substruktur der Fermionen (insb. Quarks)
- Außerdem
 - B-Hadron Physik
 - CP-Verletzung im b-Quarksystem
 - Schwerionenphysik
 - Kernmaterie bei höchsten Energie- und Teilchendichten
 - Vorwärtsphysik (?)
 - (diffraktive) Prozesse mit führenden Baryonen und 'Rapidity Gaps'



LHC - Beschleuniger

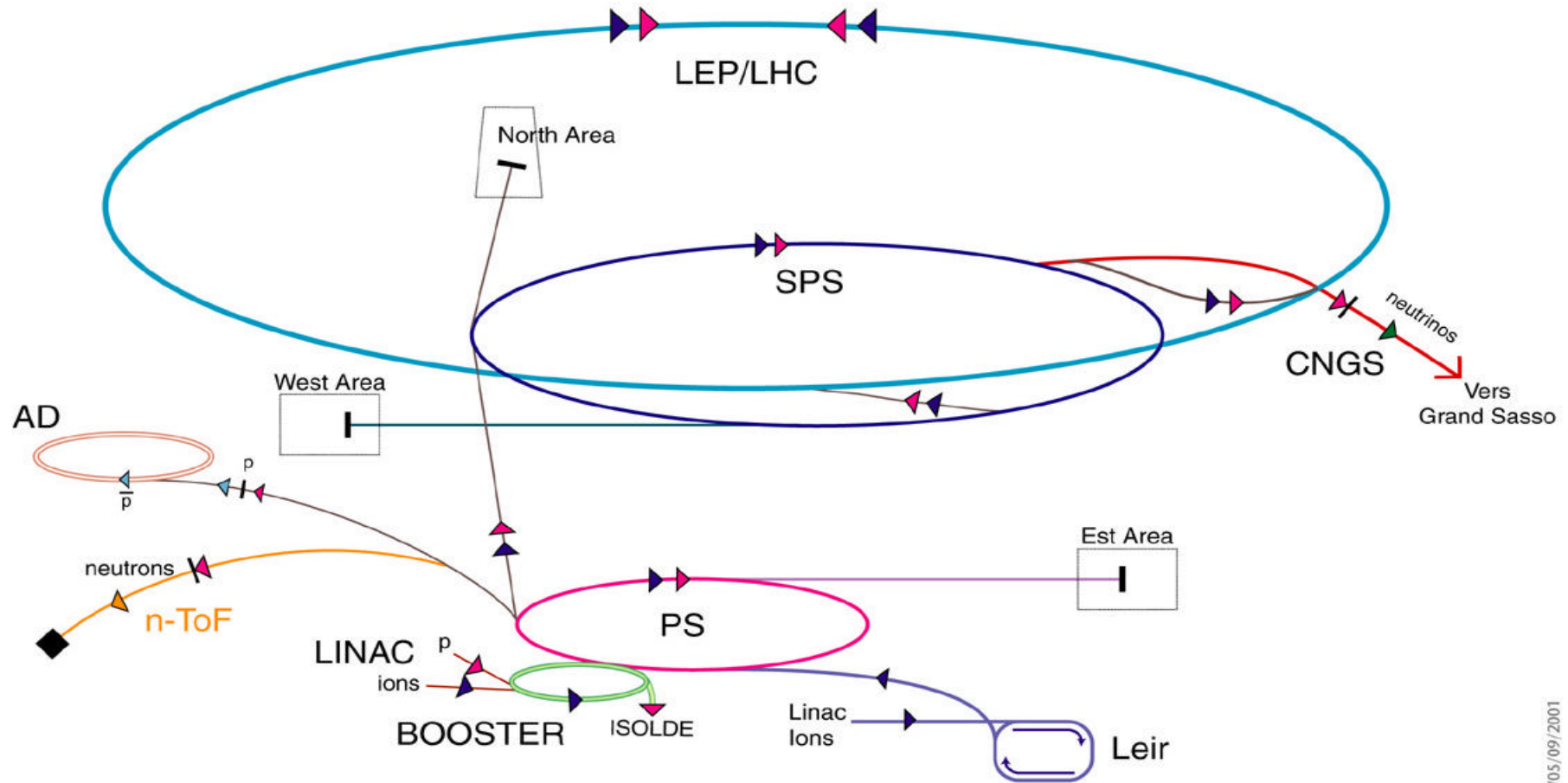
LHC - Beschleuniger



LHC - Beschleuniger



Accelerator chain of CERN (operating or approved projects)



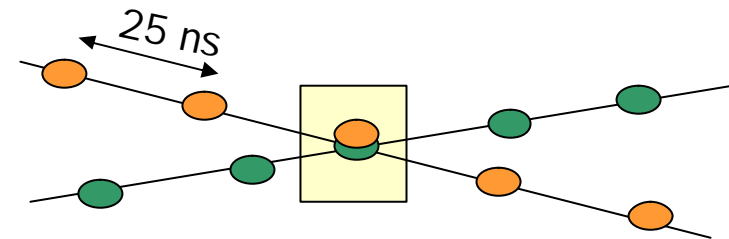
- ▶ p (proton)
- ▶ ion
- ▶ neutrons
- ▶ \bar{p} (antiproton)
- ▶ \leftrightarrow proton/antiproton conversion
- ▶ neutrinos

- AD Antiproton Decelerator
- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron

- LHC Large Hadron Collider
- n-ToF Neutrons Time of Flight
- CNGS Cern Neutrinos Grand Sasso

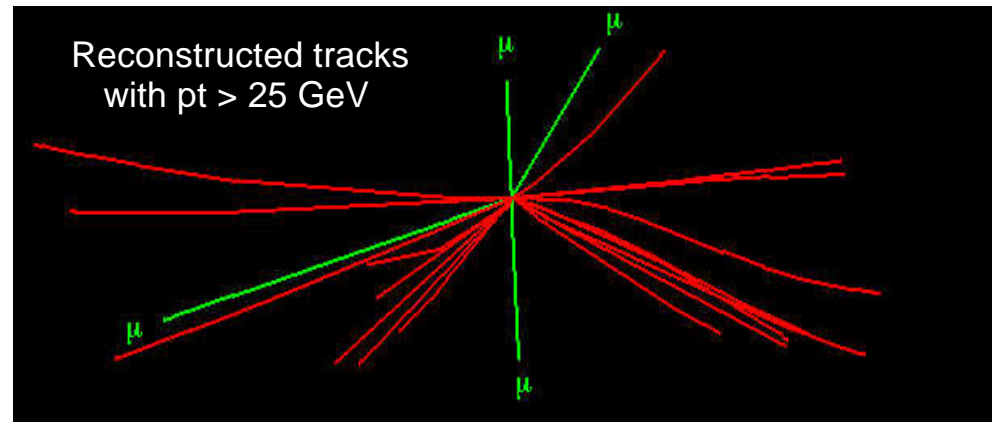
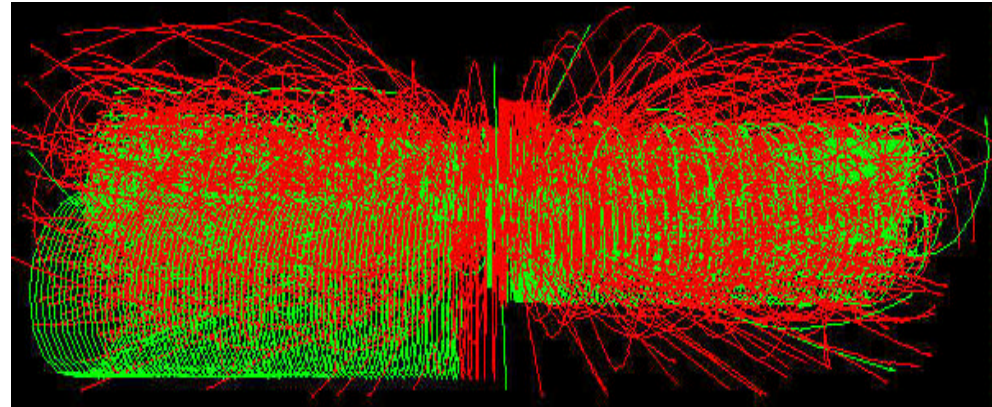


- pp Kollisionen bei $\sqrt{s} = 14$ TeV mit Rate von 40 MHz
 - Hohe Luminosität $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Rate = $L * \sigma$)
 - 100 Ereignisse pro Jahr für Wirkungsquerschnitt σ von 1 fb
- Einbau in existierenden LEP-Tunnel
 - Radius von 4.3 km
 - Über 1200 supraleitende Dipol-Magnete ($B = 8.3 \text{ T} - \text{NbTi @ } 1.9 \text{ K}$)
- Hohe Luminosität erzielt über
 - pp anstelle von $p\bar{p}$ (Tevatron)
 - hohe Intensität pro Paket
 - 10^{11} p pro Paket
 - viele (2808) Pakete
 - 25 ns Paketabstand
- Ebenfalls vorgesehen:
 - Kern-Kern Kollisionen
 - Kerne: Pb, Sn, Kr, Ar, O (z.B. Pb+Pb bei $\sqrt{s} = 1180 \text{ TeV}$)
 - Proton-Kern Kollisionen





- Hohe Kollisionsfrequenz (40 MHz)
- ~ 25 unelastische Wechselwirkungen pro Paketkollision
 - Zusätzliche Produktion von Teilchen – neben interessantem Physik-Ereignis
- Strahlungsresistenz
 - Bis zu 10^{16} n pro cm^2 und Jahr für Kalorimeter im Vorwärtsbereich
 - Bis zu 10^{15} n pro cm^2 und Jahr für zentrale innere Spurdetektoren
- Lösungsansätze
 - Schnelle Detektoren / Elektronik
 - Hohe Granularität
 - Präzision (Energie-, Impulsmessung, ...)





- Produktion der >1000 Dipole im Plan

- Auf Halde bereit zur Installation

- Probleme bei der Installation der Kühlleitungen (suprafluides He)

- Beginn im November

- Aufholen der Verzögerung durch mehr parallele Schichten



- Inbetriebnahme

- April 2007: Beginn Umlauf eines Strahls

- Sommer 2007: Kollision zweier Strahlen

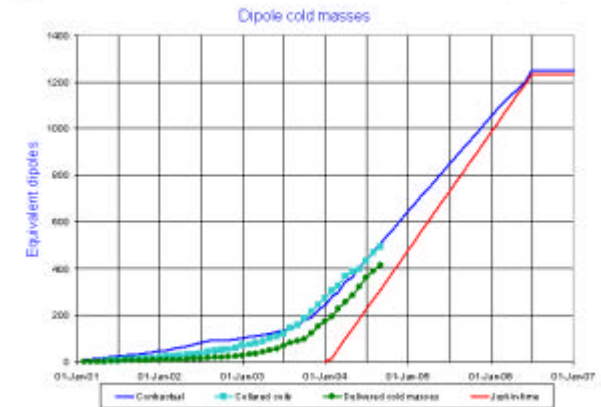
- Sehr wenige Pakete am Beginn

- 936 auf 936 Pakete (75 ns Paket-Abstand)

- 2808 auf 2808 Pakete (Erreichen nomineller Bedingungen)



LHC Progress Dashboard



Updated 31 Aug 2004

Data provided by P. Lienard AT-MAS





ATLAS - Detektor



● Prinzipieller Aufbau

→ Spurdetektor zur Impulsmessung von geladenen Teilchen

○ in Magnetfeld

→ Kalorimeter zur Energiemessung von neutralen und geladenen Teilchen

○ Unterscheidung elektromagnetisch und stark wechselwirkender Teilchen

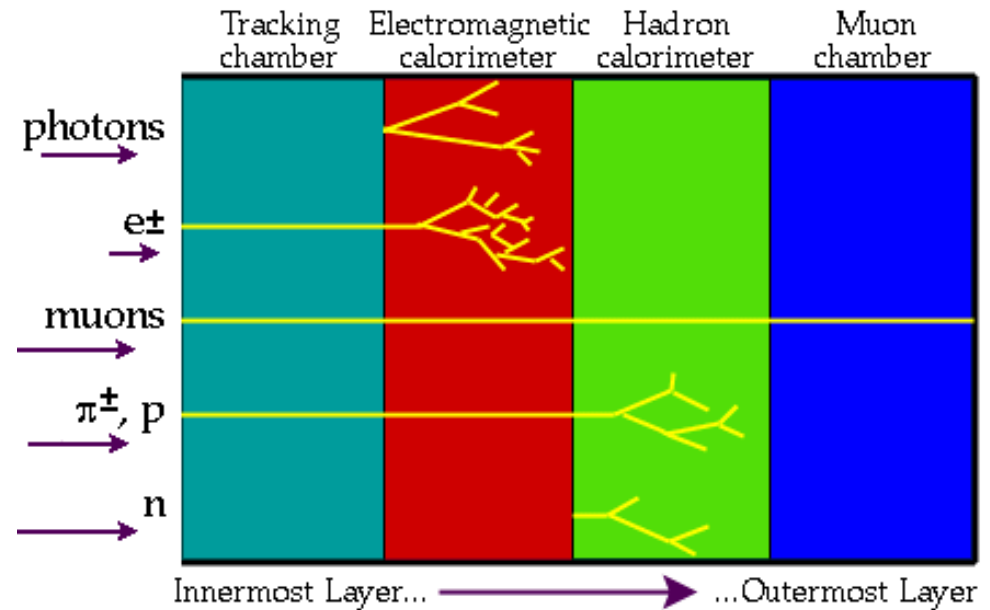
→ Myon-System zur Impulsmessung

→ Trigger und Datenerfassung zur Ereignisauswahl

● Vielzweckdetektor zur Rekonstruktion von Ereignissen über Signaturen mit e , γ , μ , τ , jet, b-jet, ...

→ Schwach wechselwirkende Teilchen (ν , ...) über Energie-Impulserhaltung („fehlende Transversalenergie“)

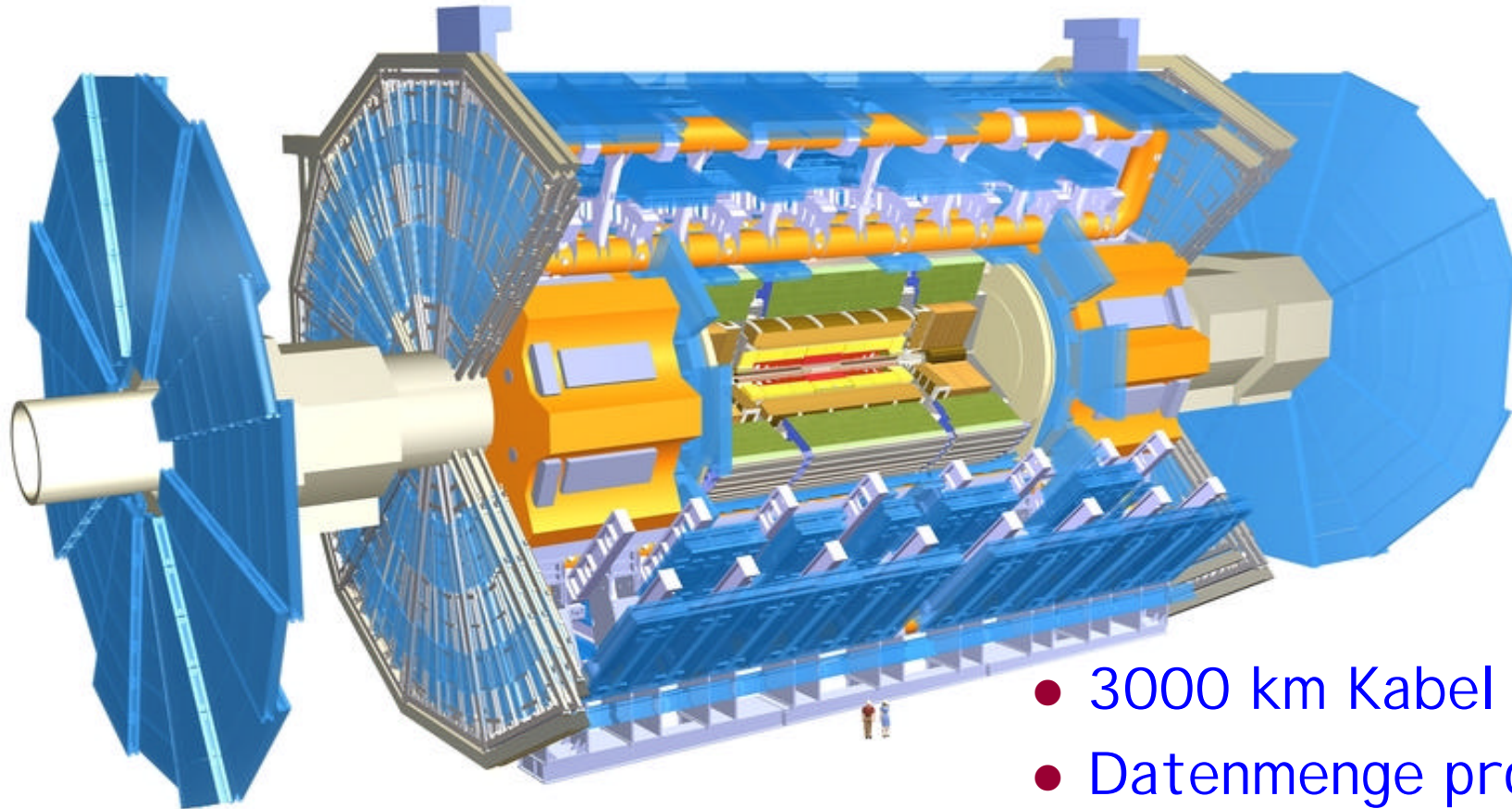
→ Energiebereich von einigen GeV bis zu einigen TeV



Der ATLAS-Detektor



- Länge: 46 m, Durchmesser 25 m
- Gewicht: 7000 t (>60% des Eiffelturms)



- 3000 km Kabel
- Datenmenge pro Sekunde: 10000 Encyclop. Britannica



- Etwa 100 m unter der Oberfläche
- UX15 (Experiment)
 - Weitere Kaverne für die Elektronik
 - Länge 65 m
 - Installation des Detektors hat begonnen





- Magnete

- 2 T Solenoid

- In Kalorimeter-Kryostat integriert



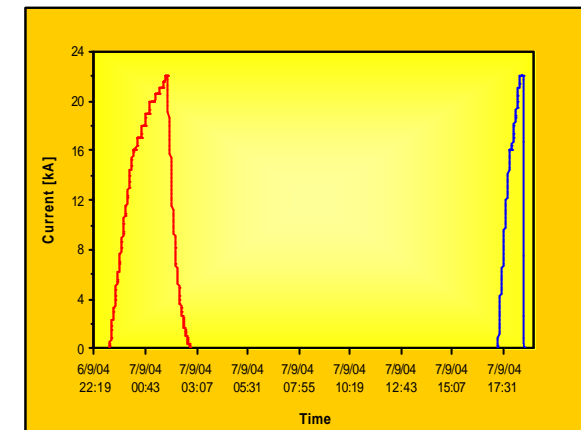
- Toroid

- Barrel

- Erste zwei Spulen getestet

- $I=22 \text{ kA}$!

- Endcap





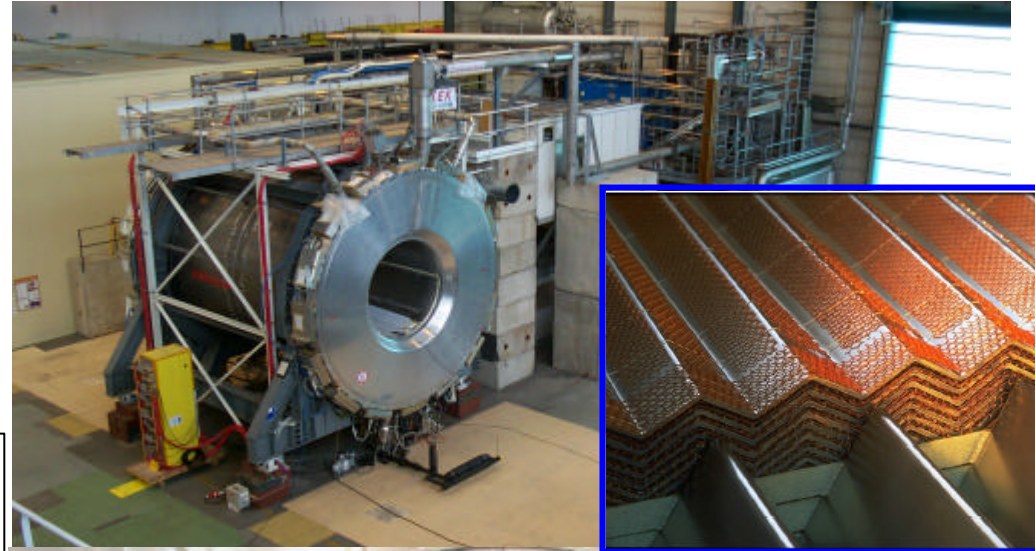
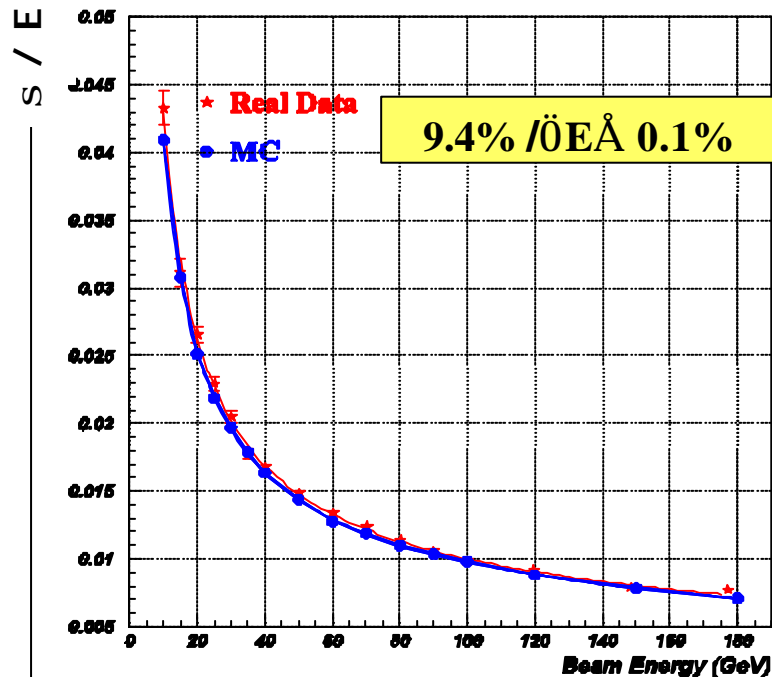
- Myon-Detektoren
 - Schnelle Trigger-Kammern
 - Präzise Driftkammern für exakte Impulsmessung





- Kalorimeter
 - Flüssig-Argon
 - Absorber in Akkordeon-Struktur

→ Teststrahl-Daten

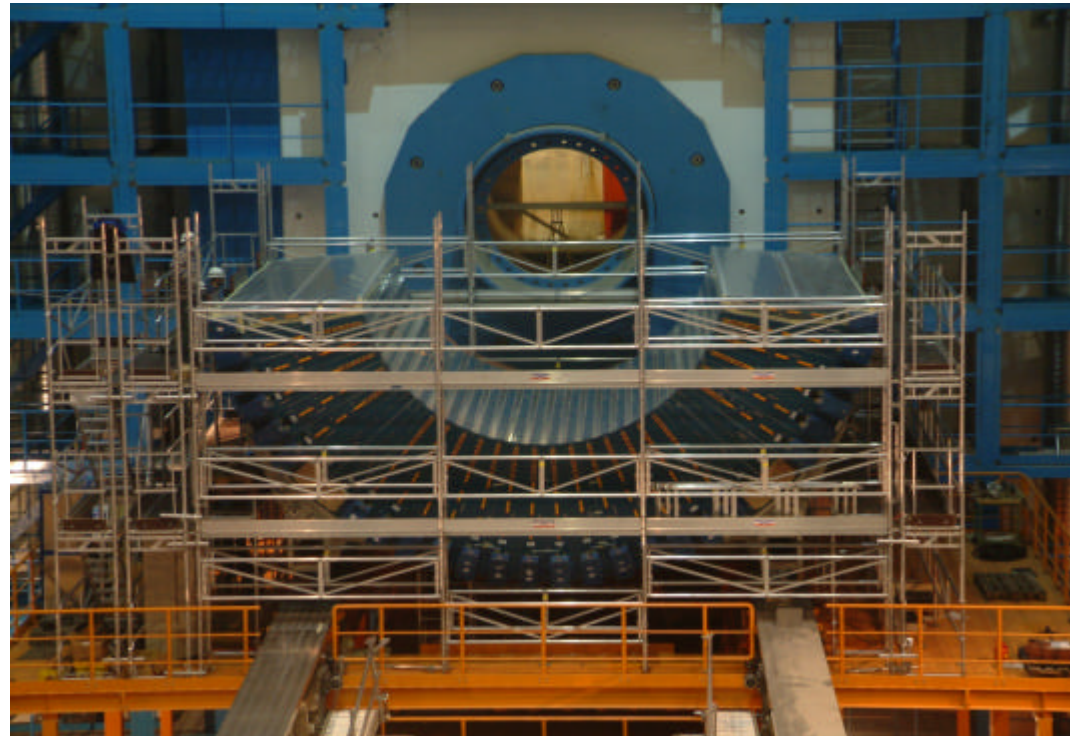




- Kalorimeter (2)

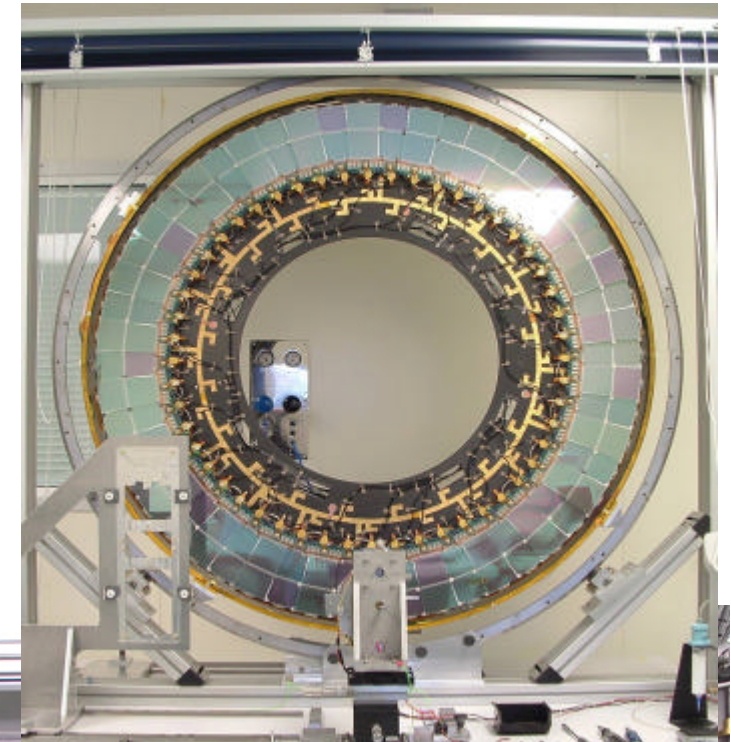
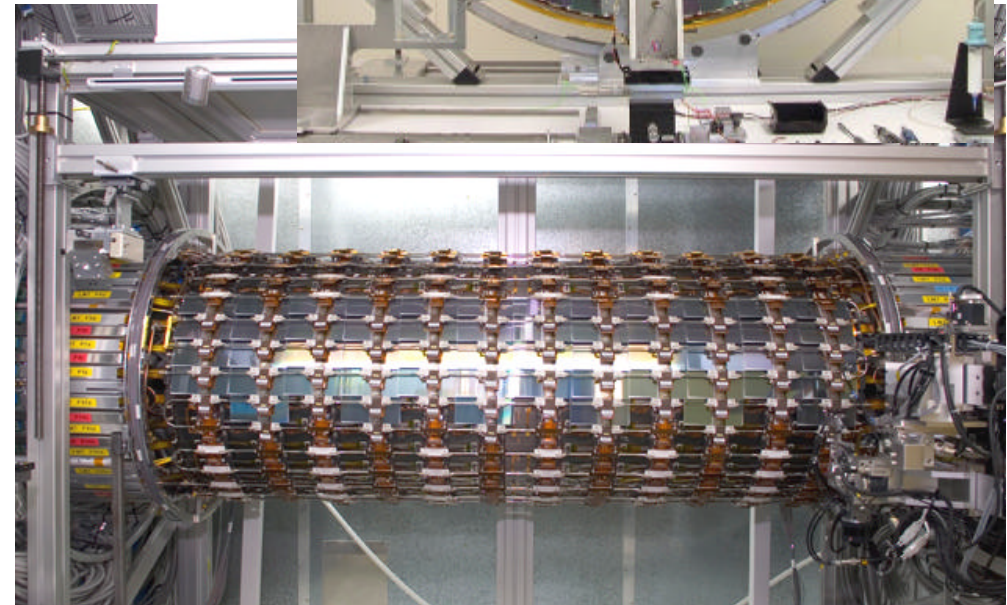
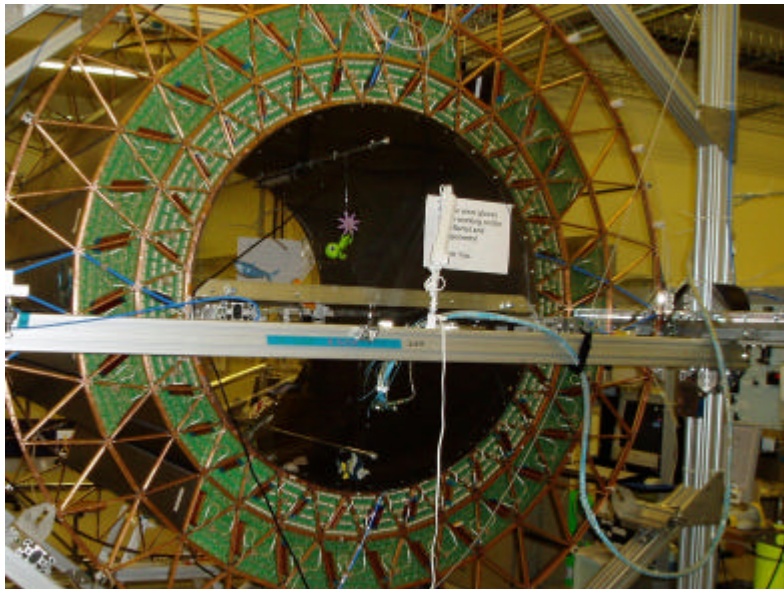
- Tile-Szintillator

- Als hadronisches Kalorimeter im zentralen Bereich





- Spur-Detektoren
 - Silizium-Pixel und -Streifen Detektoren nahe Strahlröhre
 - Übergangsstrahlungs-Detektor (TRT) weiter aussen





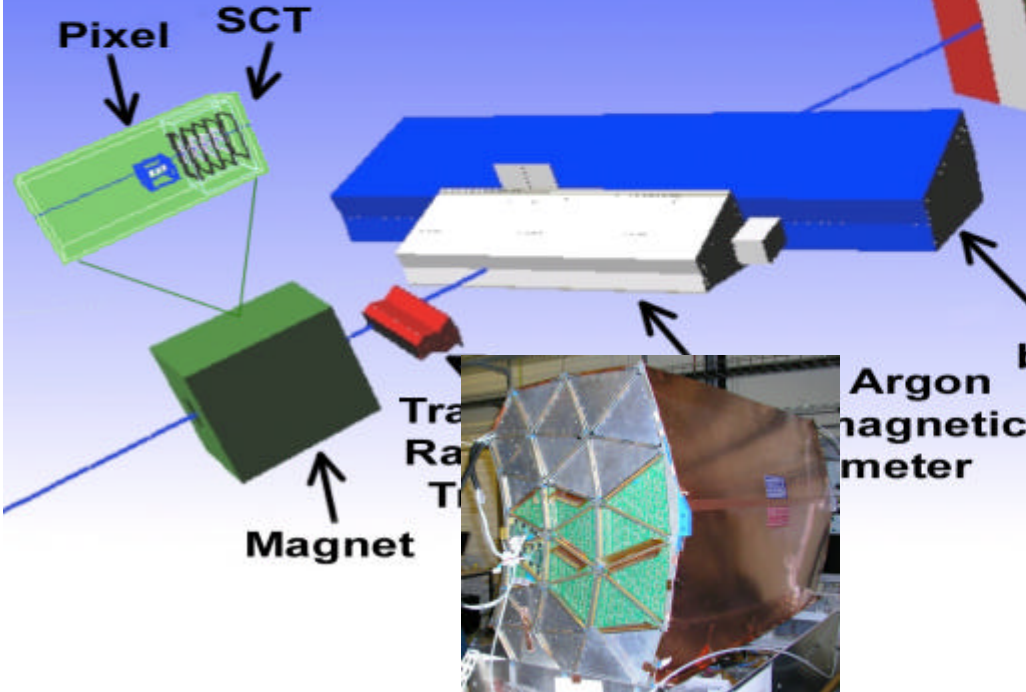
- Trigger und Datenerfassung
 - Siehe später ...
- Software
 - Betrieb des Experiments
 - Steuerung und Überwachung der Datennahme
 - Simulation (Vorhersage) des Experiments
 - Nachbildung der Wechselwirkung der produzierten Teilchen mit Detektormaterial
 - Einschließlich Sekundärteilchenproduktion
 - Nachbildung der Elektroniksignale der Detektorauslese
 - Rekonstruktion der Daten
 - Ladung/Spannung → Energien, Impulse → Vierer-Vektoren
 - „Physik-Analyse“
 - Riesige Programm-Pakete (C++, Java, ...)

Teststrahl 2004



Monitored Drift
Tubes & Resistive
Plate Chamber

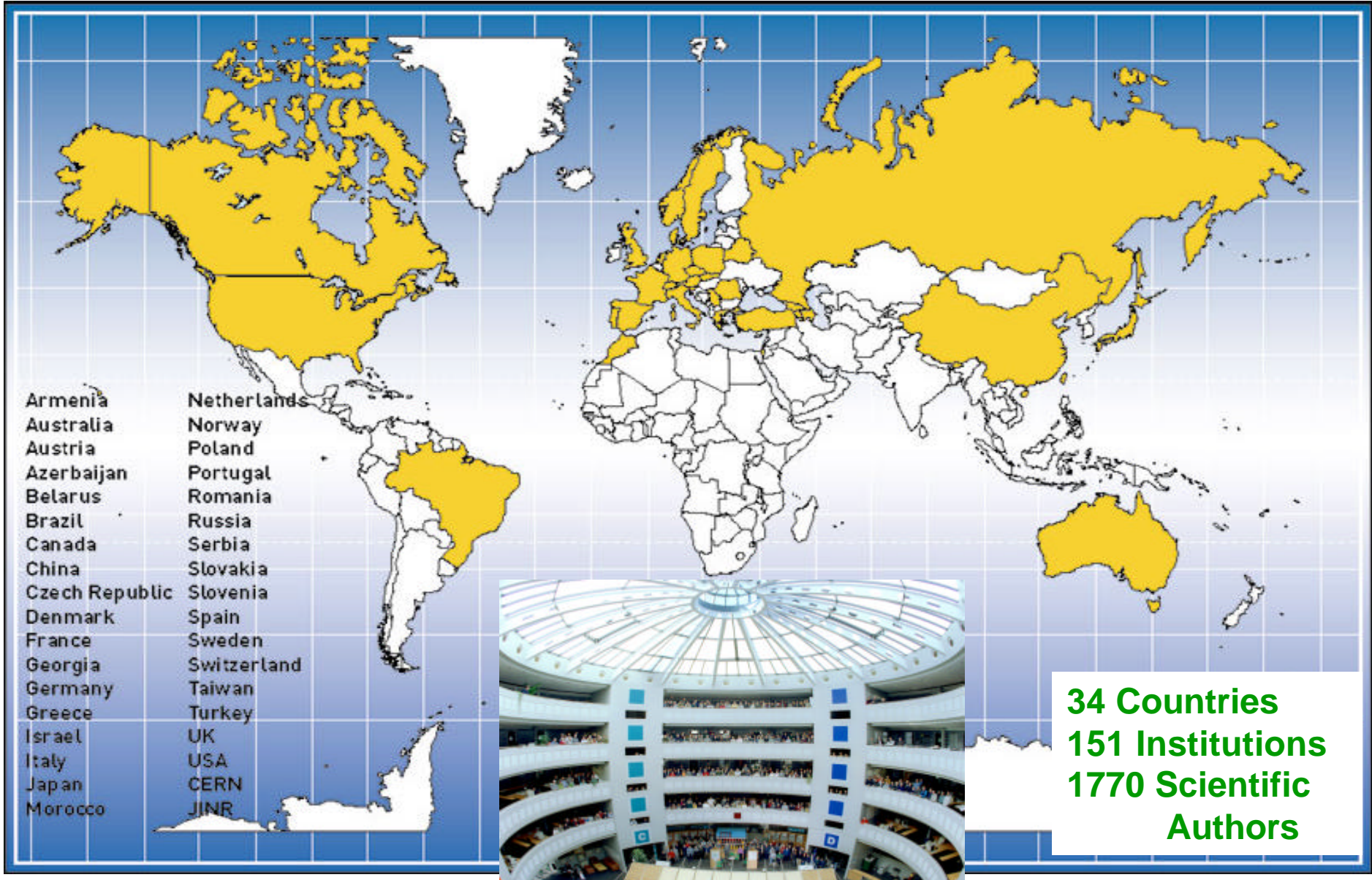
Monitored Drift
Tubes-Cathode Strip
Chamber-Thin
Gap Chamber end-cap





- **Teilchenphysik bei höchsten Energien**
 - Internationale Zusammenarbeit bei Finanzierung und Bau der Beschleuniger und Detektoren notwendig
 - Grundlagenforschung „per se“
- **Große Experiment-Kollaborationen**
 - ATLAS: 1800 Wissenschaftler aus 151 Instituten (34 Ländern)
 - Arbeit in Gruppen
 - Verschiedene Detektoren, Physikthemen, ...
 - Arbeitsteilung
 - Teilweise Spezialisierung auf Detektorbau, Datenrekonstruktion und -analyse
 - Interne Konsistenzüberprüfung von Resultaten
 - Studenten (Diplomanden, Doktoranden) in das internationale Umfeld eingebunden

ATLAS: Weltweite Kollaboration





Physik - Potential

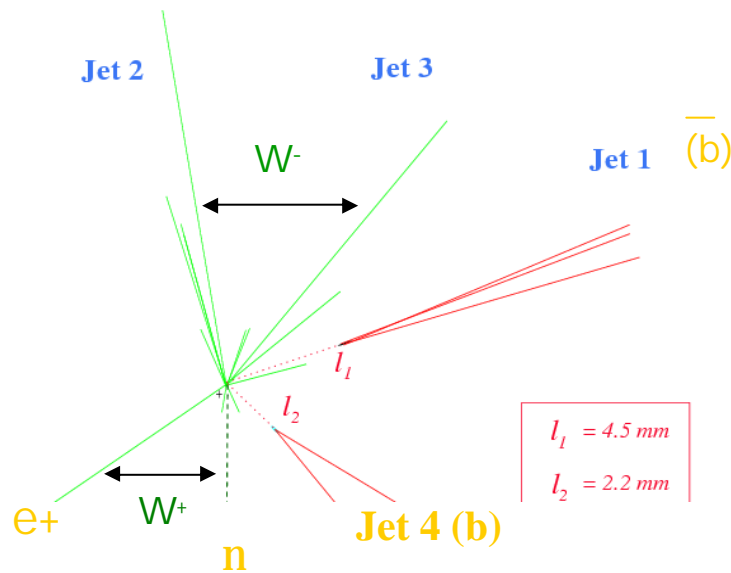


- Studien (basierend auf Simulationen) zur Auslotung der Fähigkeiten
 - Sowie Optimierung des Detektors vor Konstruktion
 - Annahme eines nahezu perfekten Detektors
- Wie stellt ATLAS sicher, daß Detektor diese Leistungsfähigkeit (schnell) erreichen wird?
 - Redundante Kalibrations- und Ausrichtungssysteme
 - Aufwendige Teststrahlungsmessungen
 - Von (einigen) endgültigen Detektormodulen
 - Kalibration mit Physik-Ereignissen
 - Kosmische Myonen
 - Strahl-Gas Wechselwirkungen
 - $Z \rightarrow l+l$ Ereignisse



- Beispiel für Messungen mit ersten Daten
 - Detektor noch nicht im Detail verstanden

Ereignis: $\bar{t}t \rightarrow bW b\bar{W} \rightarrow bl\nu bjj$



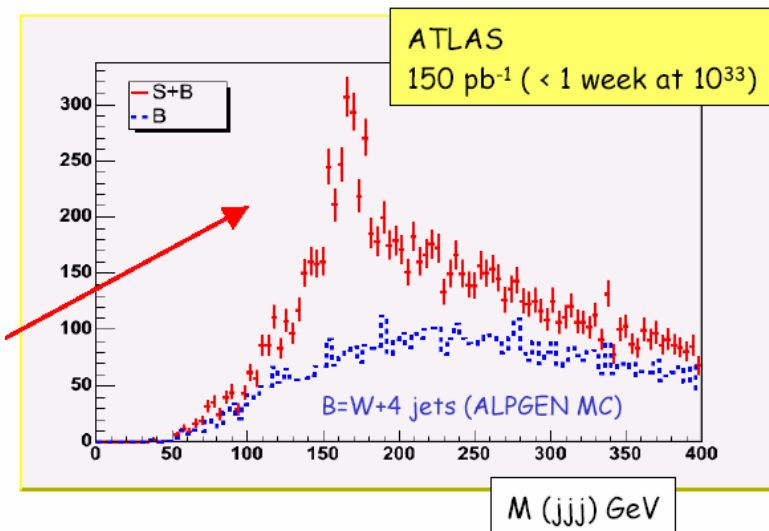
b-Jets (Sekundärvertex) $\tau(\text{b-Hadron}) \sim 1.5 \text{ ps}$
 → Zerfall einige mm von pp Wechselwirkung
 → Nachweis mit Si-Detektoren

- Signal für top-Quark

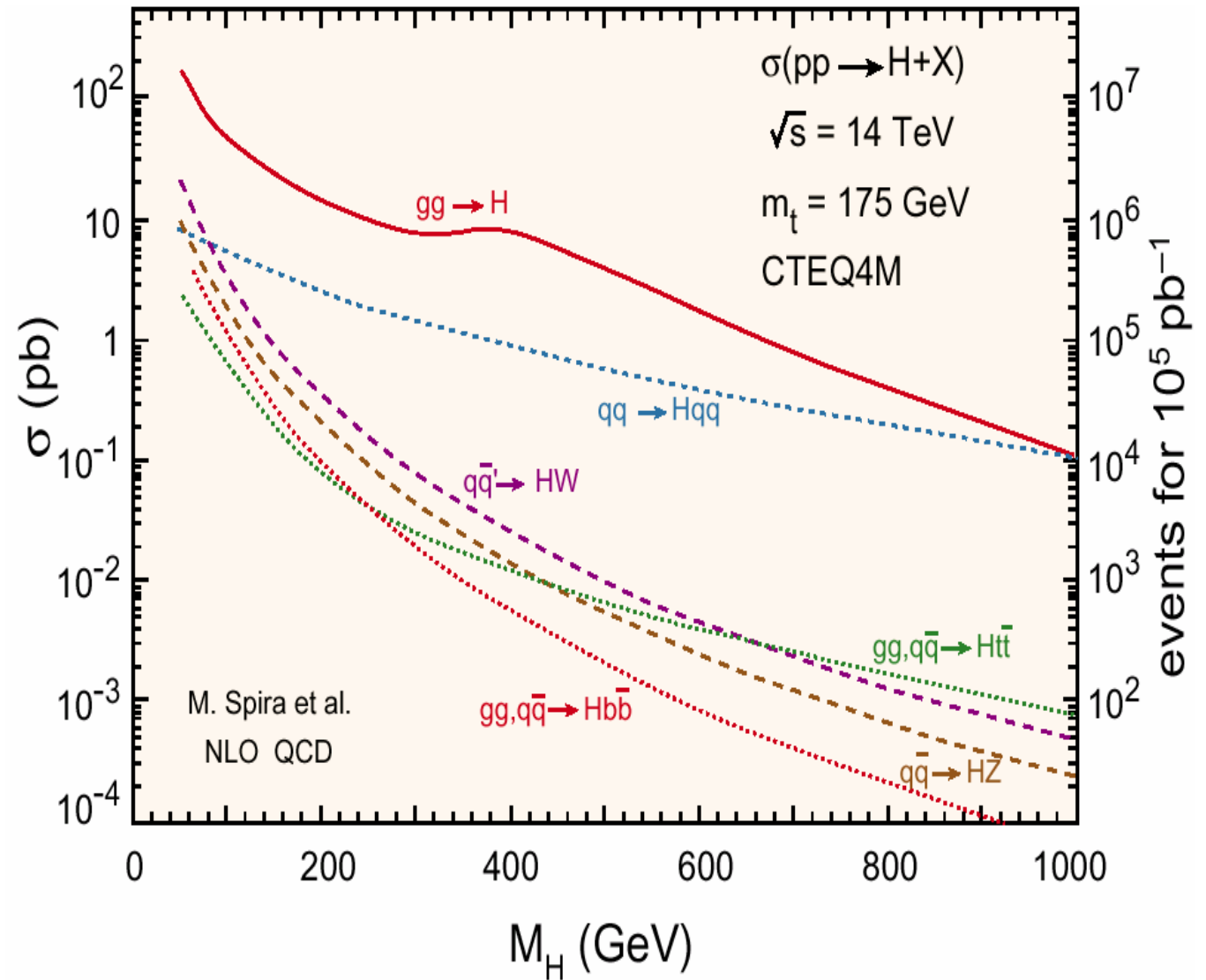
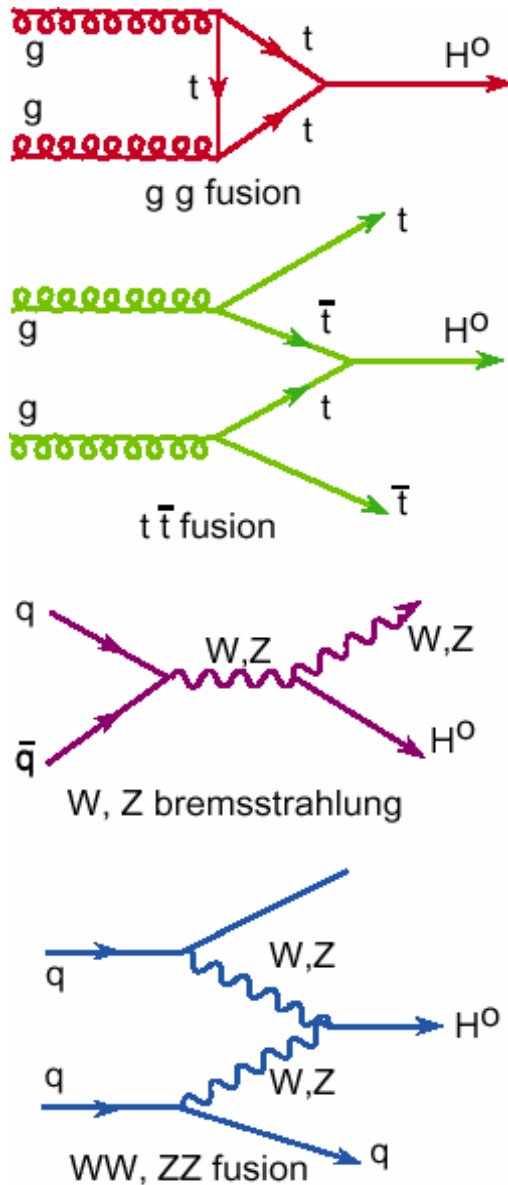
- Sehr einfache Selektion
- Keine großen Ansprüche an Detektor

○ Keine Rekonstruktion von b-Jets

Top
Signal



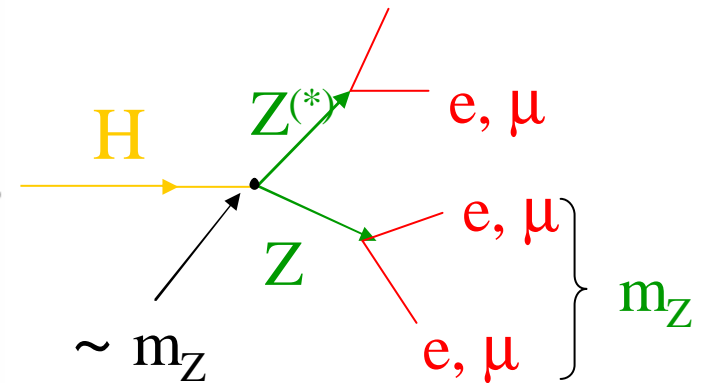
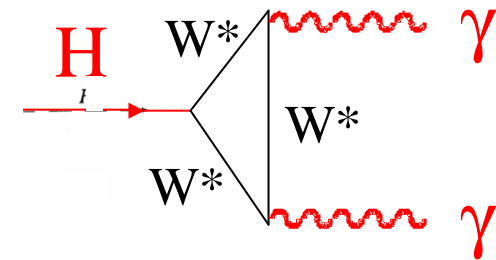
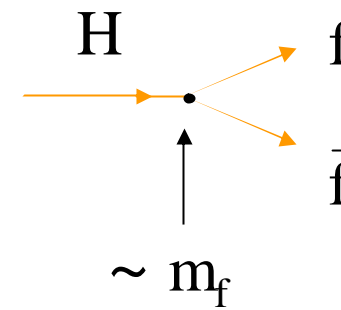
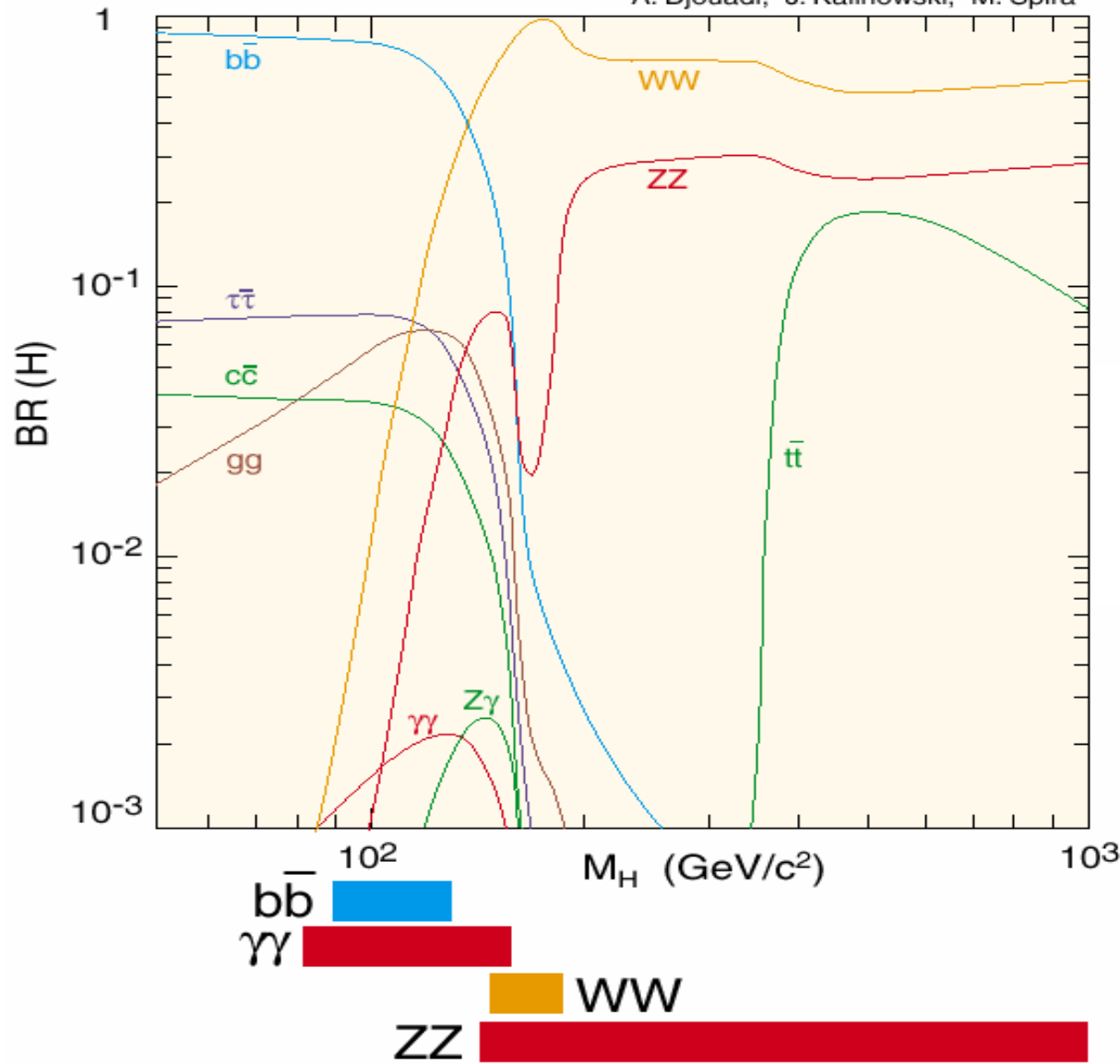
Higgs-Boson Produktion



Higgs-Boson Zerfall



A. Djouadi, J. Kalinowski, M. Spira





- Mehrere, komplementäre Kanäle

- $H \rightarrow \gamma\gamma$

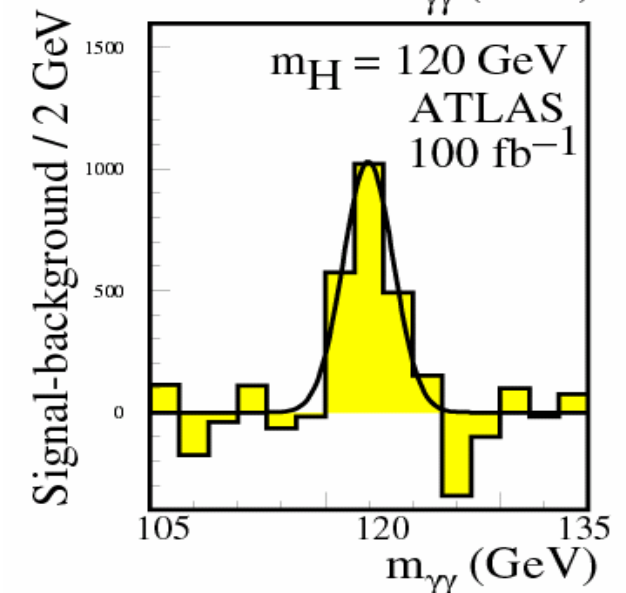
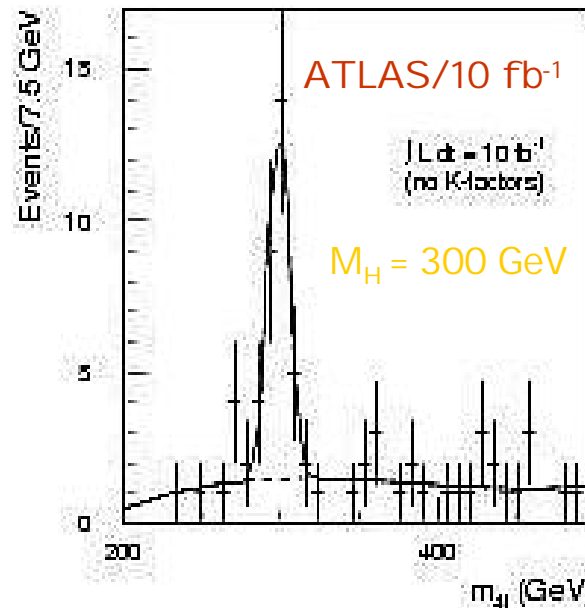
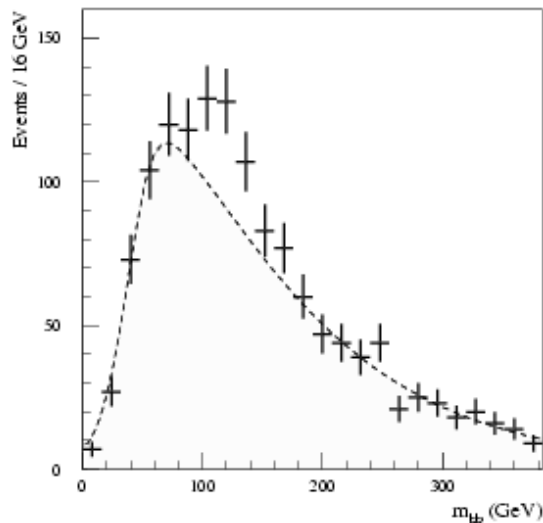
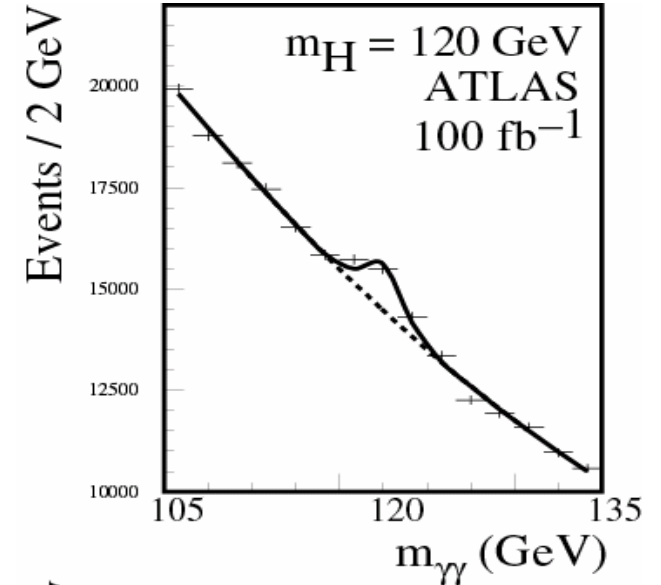
- Seltener Zerfall

- $ttH \rightarrow tt\ b\bar{b}$

- Hoher Untergrund

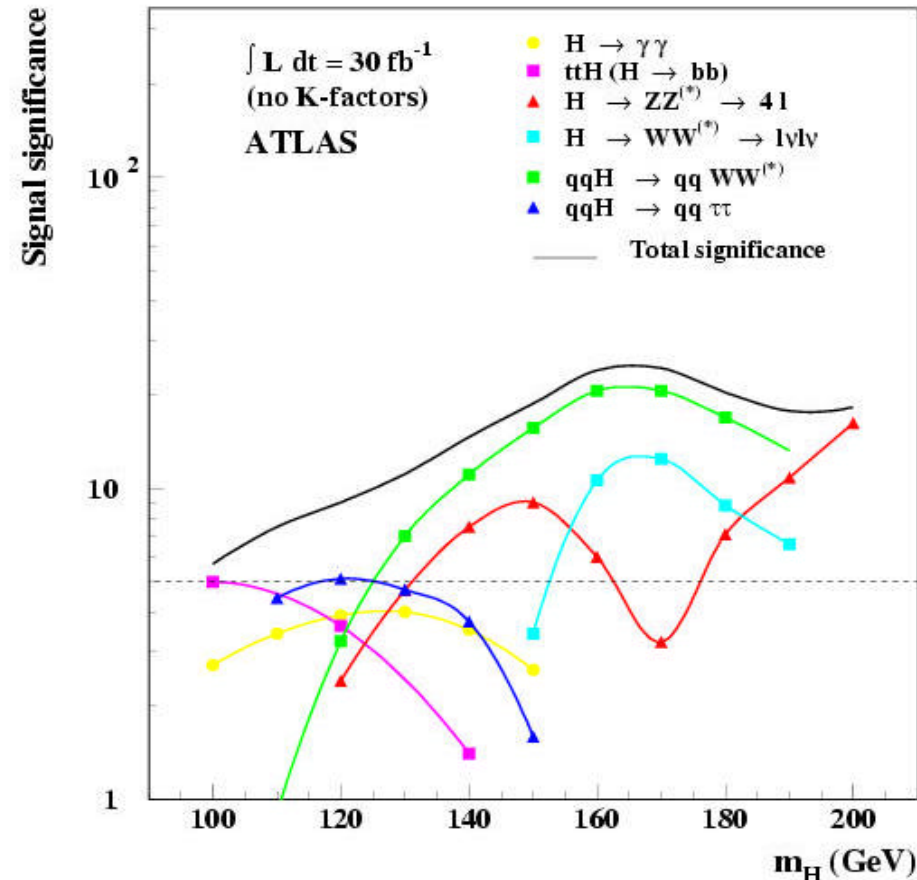
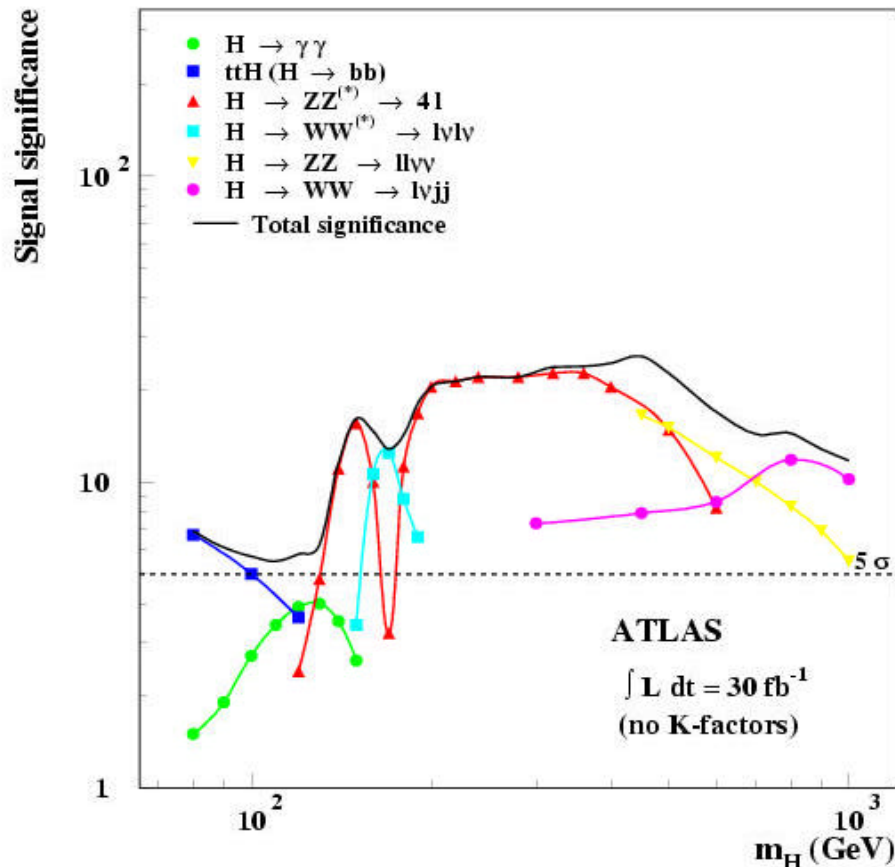
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

- Wenig Untergrund





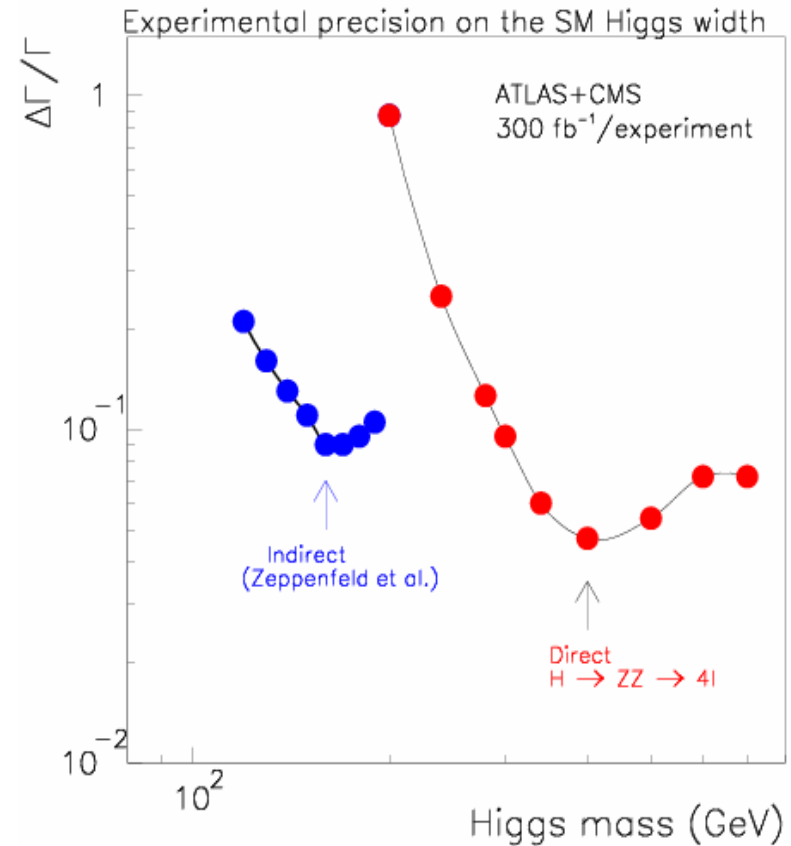
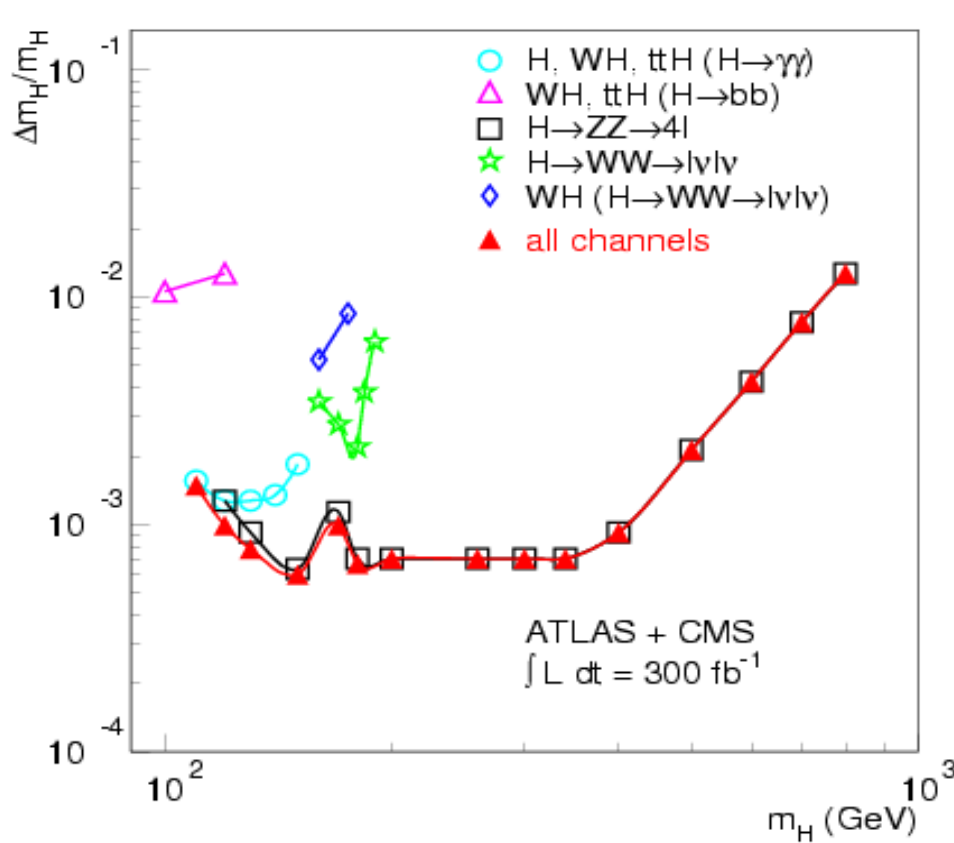
- Signifikanz $S = N_S / \sqrt{N_B}$
 - Entdeckung: $S > 5$ (Wahrscheinlichkeit einer statistischen Fluktuation ist $\approx 10^{-7}$)



Higgs-Parameter Bestimmung



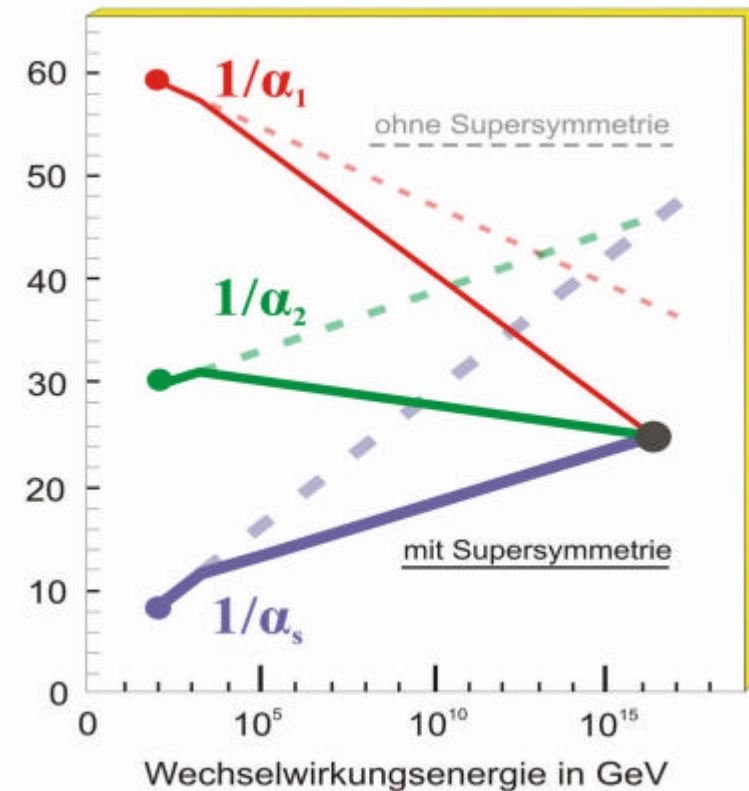
- Vermessung der Higgs-Masse und -Breite

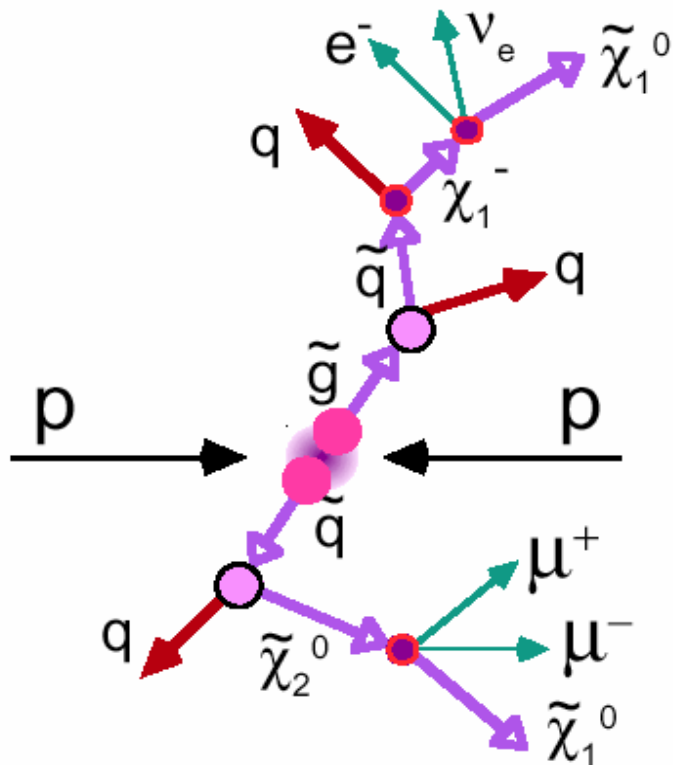


- Higgs-Kopplungen an Fermionen/Bosonen



- SM: Niederenergie-Näherung fundamentalerer Theorie
 - Mehrere Kandidaten (SUSY, Technicolour, LED, ...)
 - Skalenvorhersage von O(1 TeV)
- Supersymmetrie (SUSY)
 - Motivation:
 - Vereinheitlichung der Kopplungen/
Kräfte bei höchsten Energien
 - Neue Symmetrie
 - Fermionen - Bosonen
 - muss gebrochen sein
 - noch keine Superteilchen beobachtet
 - Bisherige Ausschlußgrenzen
 - Squarks/Gluinos: > 200-300 GeV
 - Sleptonen/Charginos: > 90-100 GeV
 - Leichtestes Neutralino: > 46 GeV

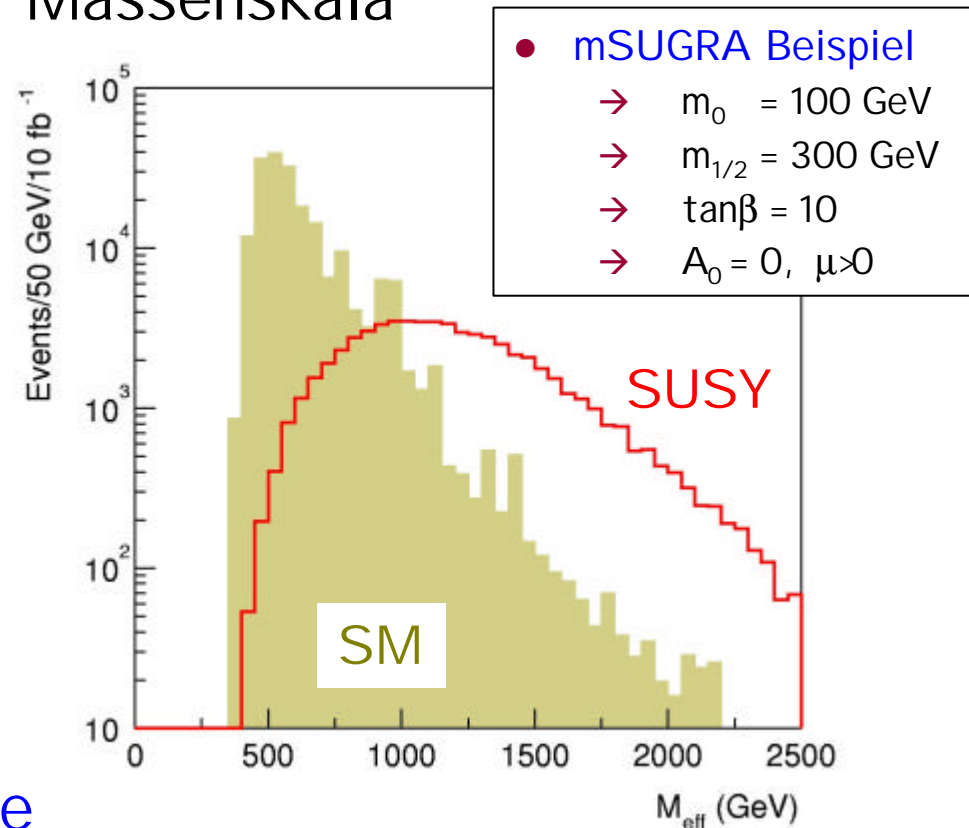




- Effektive Masse M_{eff}

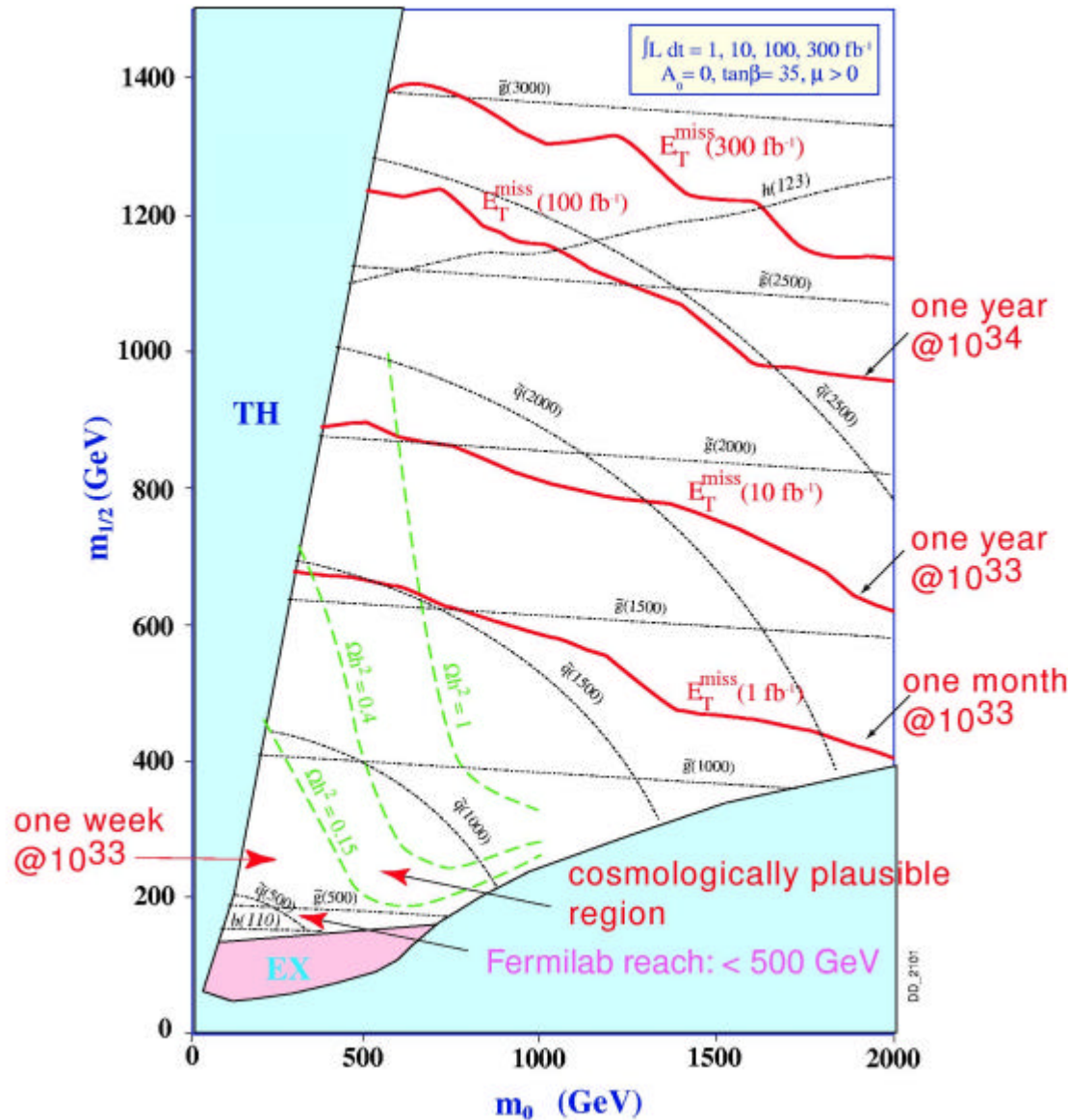
$$M_{eff} = E_T^{miss} + P_T^1 + P_T^2 + P_T^3 + P_T^4$$

→ erlaubt Bestimmung der Massenskala

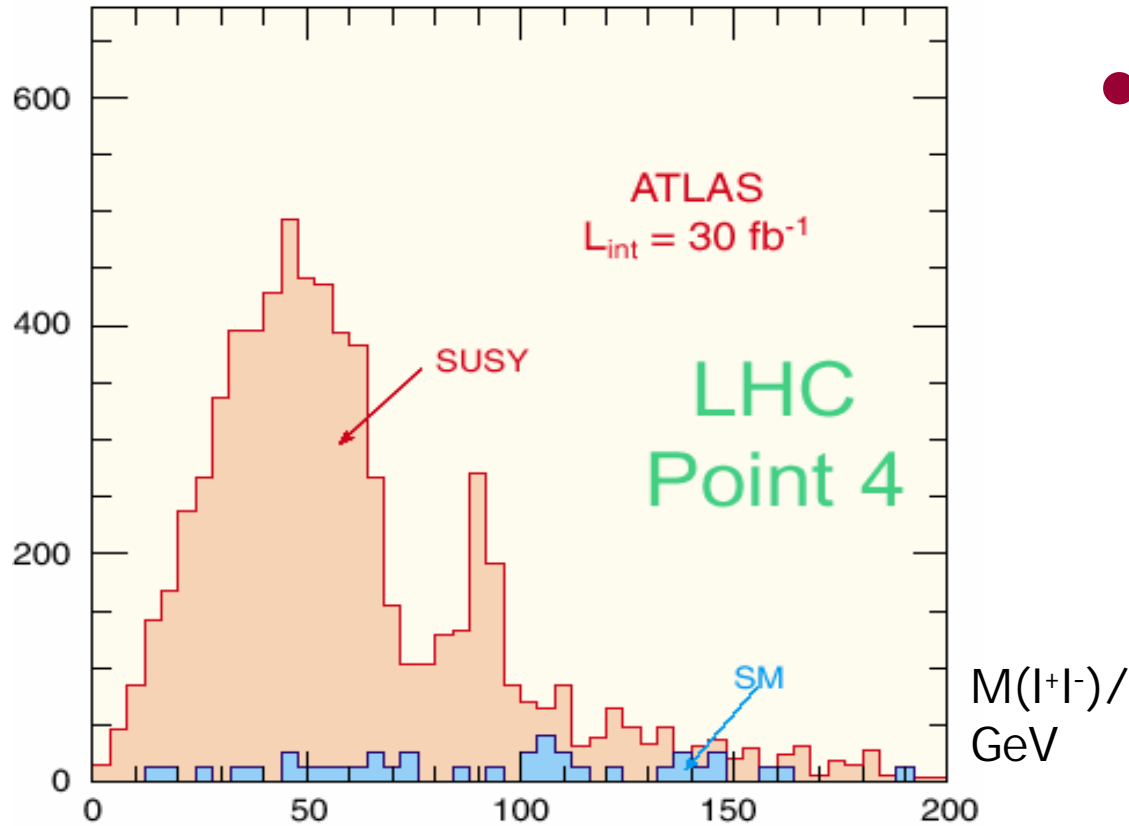


- Eindeutige Signaturen
 - Jets, Leptonen, E_T^{miss} (LSP)
 - aus der Zerfallskaskade
- Produktion durch starke Wechselwirkung → hohe Rate

Suche nach Supersymmetrie



- Hohe Schwerpunktsenergie
→ Grosser Massenbereich zugänglich
- Grosse Wirkungsquerschnitte
○ Produktion durch starke Wechselw.
→ Hohe Raten
- Frühe Entdeckung mit geringer Luminosität möglich
→ Parameter schwieriger



● Beispiel:
 Zwei Leptonen
 Massenspektrum

→ Zerfall

$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 l+l^-$$

○ auch ein Beitrag von

$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 Z$$

→ Endpunkt in der Leptonpaarmasse bestimmt die Massendifferenz

$$\tilde{\chi}_2^0 - \tilde{\chi}_1^0$$

● Erwartete Genauigkeit von 10%

→ Einschränkung an zugrundeliegende Modellparameter



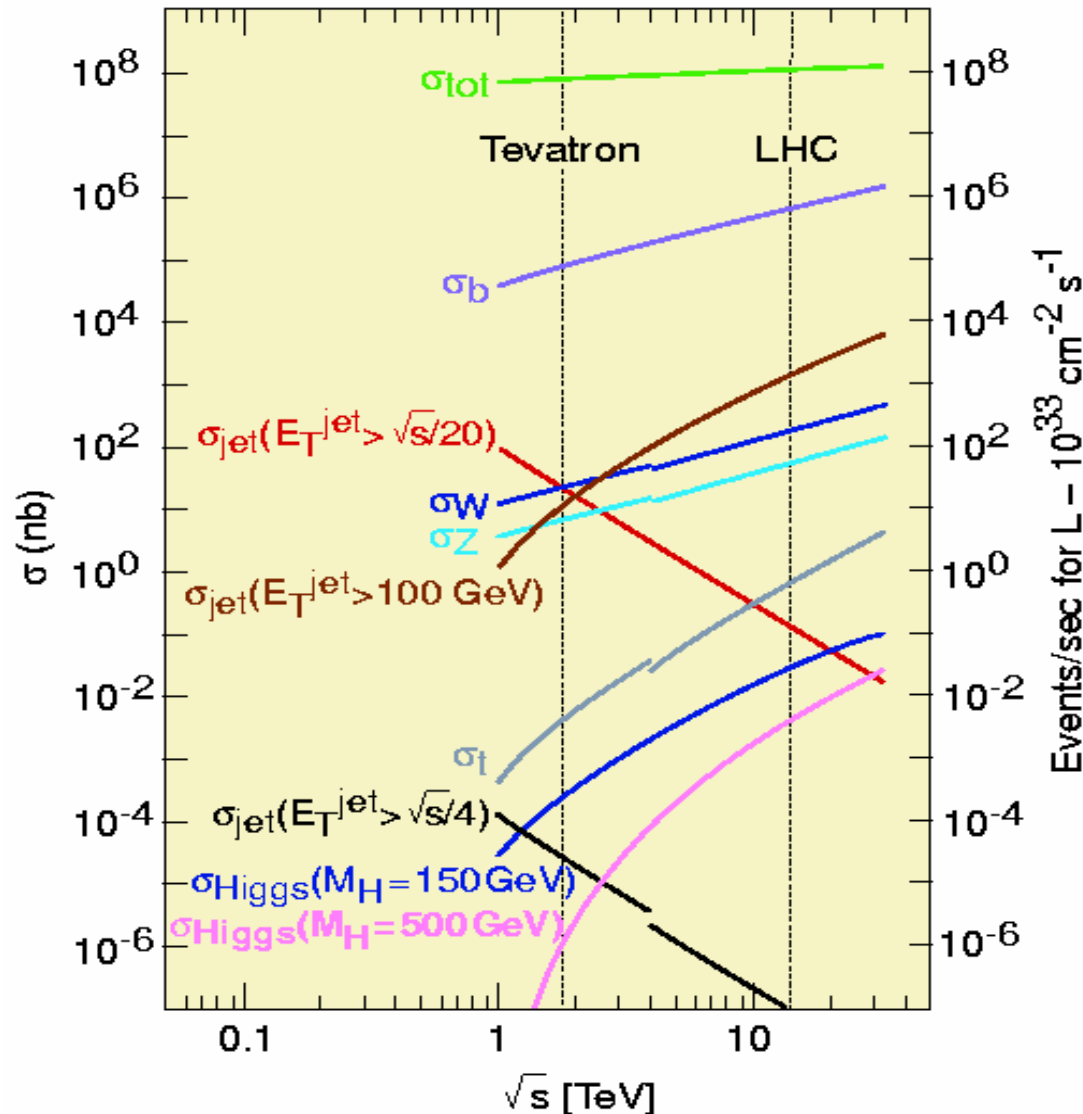
Trigger und Datenerfassung



- p-p Kollisionen alle 25 ns (40 MHz)
- Etwa 25 inelastische Ereignisse pro Kollision
- Hohe Detektorgranularität (10^8 Kanäle)
 - Größe eines Ereignisses etwa 1-2 MByte
- Datenrate von 100 TByte/s (10^{14} Byte/s)
 - Entspricht etwa 20000 DVD's pro Sekunde!
- Wirkungsquerschnitt für interessante Prozesse typischerweise klein (Raten < 1 Hz)
 - Sehr effiziente Selektion in quasi Echtzeit nötig!
 - Hohe Unterdrückung von uninteressanten Ereignissen um Faktor 1 in 10^7



Proton - (anti)proton cross sections



Enorme Unterschiede in Wirkungsquerschnitten

→ Für $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

→ gesamt

○ $\sigma \approx 100 \text{ mb}$ (10^9 Hz)

→ b Produktion

○ $\sigma \approx 0.7 \text{ mb}$ ($7 \cdot 10^6 \text{ Hz}$)

→ W/Z

○ $\sigma \approx 200/60 \text{ nb}$ ($2/0.6 \text{ kHz}$)

→ top

○ $\sigma \approx 0.8 \text{ nb}$ (80 Hz)

→ Higgs ($m_H = 150 \text{ GeV}$)

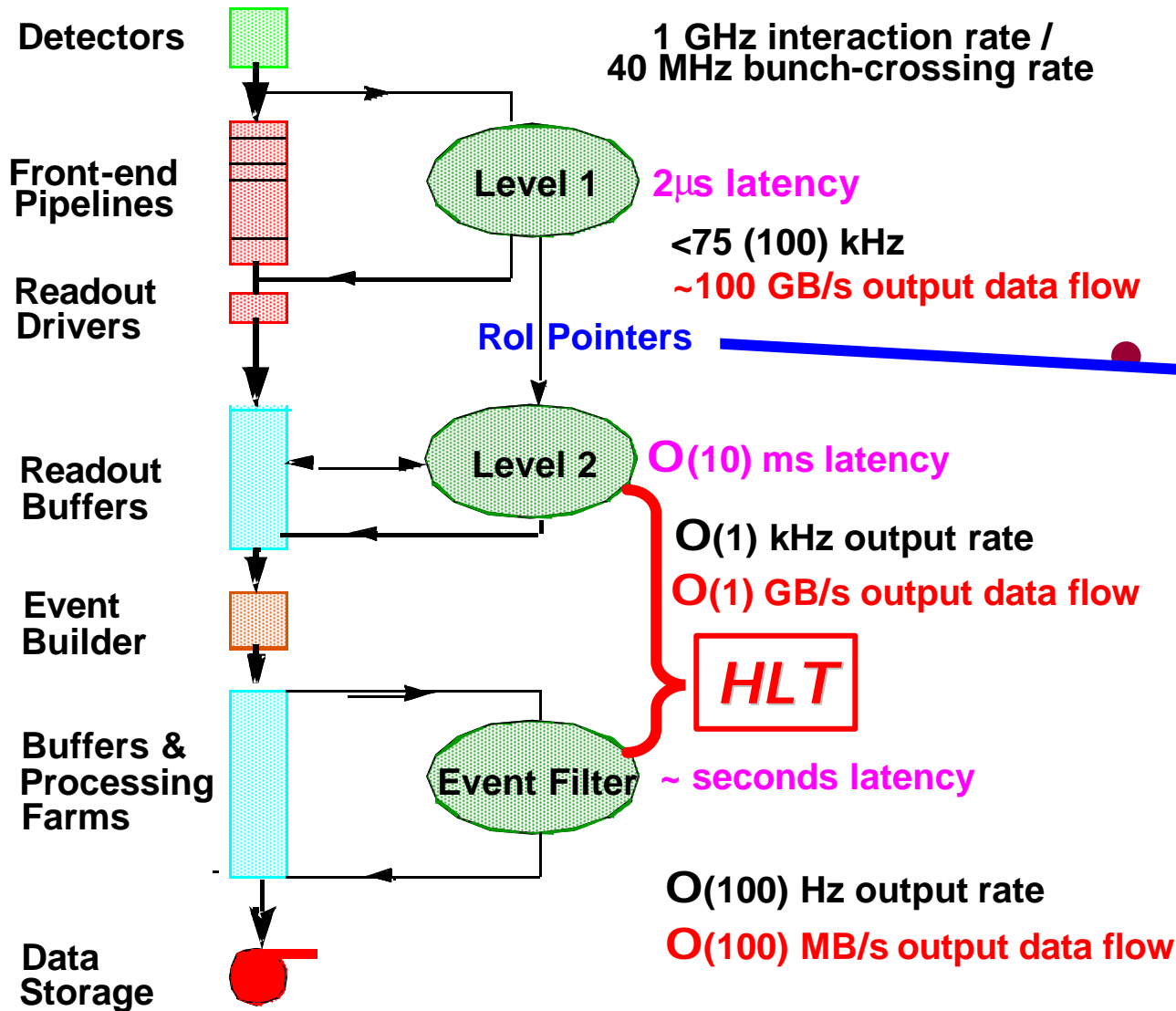
○ $\sigma \approx 30 \text{ pb}$ (3 Hz)

Mit Berücksichtigung der Verzweungsverhältnisse

→ $W \rightarrow e\nu$ 150 Hz

→ $Z \rightarrow ee$ 15 Hz

→ $H \rightarrow \gamma\gamma$ 0.003 Hz

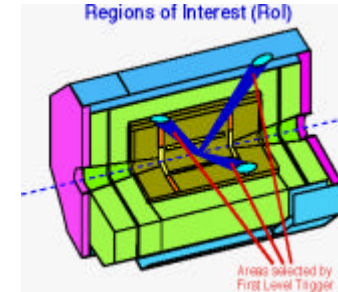


LVL1

- Hardware based (FPGA and ASIC)
- Coarse calorimeter granularity
- Trigger muon detectors

LVL2

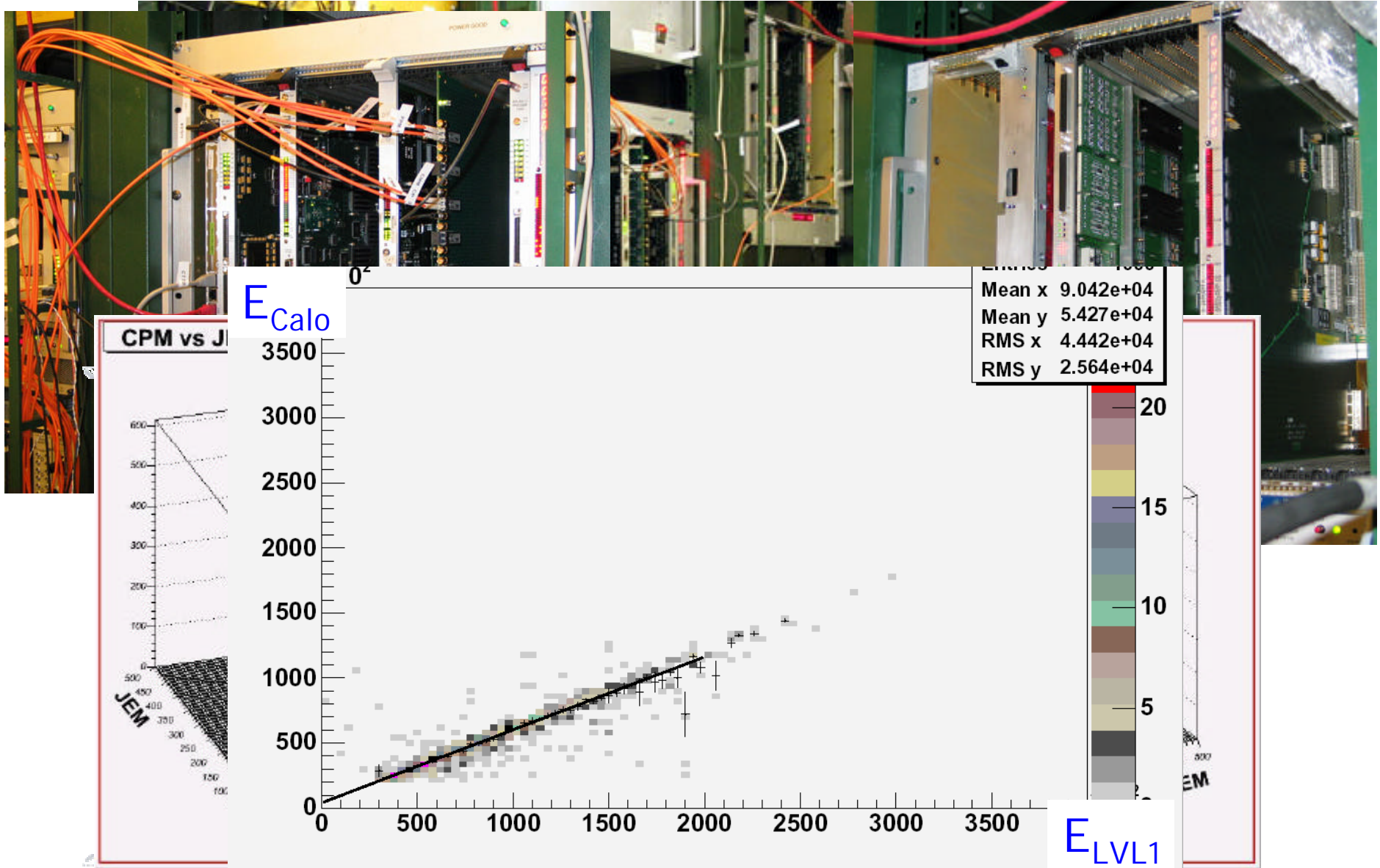
- Region-of-Interest (RoI)
- Specialized algorithms
- Fast selection with early rejection



EF

- Full event available
- Offline derived algorithms
- Seeding by LVL2
- Best calibration / alignment
- Latency less demanding

LVL1-Kalorimeter Trigger Teststrahl





Das Ende naht ...



- Konstruktion des Beschleunigers schreitet stetig voran
- ATLAS Experiment befindet sich im Aufbau
 - Die meisten Komponenten sind schon produziert
 - Umfangreiches Teststrahl-Programm Mai - Oktober 2004
 - Alle Subdetektoren, Integration der verschiedenen Komponenten
- Erste „Daten“ (kosmische Myonen) in zweiter Hälfte 2006
- Erste Kollisionen im Jahre 2007
 - Nach einer Phase mit nur einem Strahl in der Maschine
- Gute Leistungsfähigkeit von ATLAS bei Start
 - Ausführliches Teststrahl-Programm
 - Qualitätskontrolle bei der Konstruktion
 - Redundante Kalibrationssysteme
- Endgültige Leistungsfähigkeit des Detektors
 - Inbetriebnahme und Verständnis mit Daten
 - Braucht Zeit (und Daten)



- Standard-Modell der Teilchenphysik sehr erfolgreich
 - Beschreibung der fundamentalen Bausteine der Materie und ihrer Wechselwirkungen
- Keine vollständige Theorie, viele offene Fragen
- LHC (und ATLAS) wird im Jahre 2007 in „Terra Incognita“ vorstoßen
 - Besseres Verständnis der Struktur der Materie auf den kleinsten Skalen
 - Zusammenhang mit Physik bei den größten Skalen
- Maschine und Detektor im Zusammenbau
- Vorbereitung der Datennahme und -auswertung

Cartoon by C. Grupen

